

**Danilo Dupin da Silva**

**Modelagem de Equipamentos FACTS de  
Segunda Geração no Problema de Fluxo de  
Potência Ótimo**

Florianópolis

2008

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

# **Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema de Fluxo de Potência Ótimo**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

**Danilo Dupin da Silva**

Florianópolis, dezembro de 2008

# **Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema de Fluxo de Potência Ótimo**

**Danilo Dupin da Silva**

‘Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas de Energia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof<sup>ª</sup>. Katia Campos de Almeida, Ph D.  
Orientadora

---

Prof<sup>ª</sup>. Katia Campos de Almeida, Ph D.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Katia Campos de Almeida, Ph D. (Presidente)

---

Edimar José de Oliveira, Dsc.

---

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

## AGRADECIMENTOS

*A minha orientadora Katia Campos de Almeida, por todos os conselhos, dedicação e apoio que me foram proporcionados durante a realização deste trabalho.*

*A todos os professores do Laboratório de Sistemas de Potência pelos preciosos ensinamentos e conselhos dados.*

*Aos meus colegas de laboratório, pelos momentos de descontração e união durante longos períodos de estudo.*

*Aos meus pais, Argeu Rocha da Silva e Avelima Dupin da Silva, que mesmo a distância me deram todo o apoio moral nos momentos difíceis.*

*A minha namorada Aline Monique Bortolini, pela paciência e compreensão durante os meus momentos de ausência.*

*À minha irmã Darlene Dupin da Silva e meu querido sobrinho Eduardo da Silva.*

*Ao professor Luciano Vitória Barboza, que me incentivou muito desde os tempos de graduação a realizar este trabalho.*

*Ao CNPq e meus pais pelo apoio financeiro.*

*A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram e torceram pela realização deste trabalho. Muito Obrigado.*

**Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica**

**Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema  
de Fluxo de Potência Ótimo**

**Danilo Dupin da Silva**

Dezembro/2008

Orientadora: Katia Campos de Almeida, Ph.D.

Área de Concentração: Sistemas de Energia.

Palavras-chave: Equipamentos FACTS de Segunda Geração, Fluxo de Potência Ótimo, Análise em Regime Permanente, Região de Segurança.

Número de Páginas: xvi + 113.

Esta dissertação apresenta uma modelagem detalhada dos Equipamentos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) baseados em conversores CC-CA no problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). O objetivo da modelagem é analisar o impacto desses equipamentos na operação em regime permanente de sistemas elétricos de potência. Três equipamentos são considerados: o STATCOM (Compensador Estático Síncrono), SSSC (Compensador Série Síncrono Estático) e o UPFC (Controlador Unificado de Fluxo de Potência).

Feita a modelagem, os estudos têm início com uma busca do melhor ponto de inserção do equipamento no sistema. Esse ponto é obtido através de indicadores de sensibilidade fornecidos pelo programa de FPO implementado. Posteriormente, é feita uma comparação das Regiões de Segurança do sistema definidas com e sem o equipamento FACTS em operação. O aumento da Região de Segurança indica a melhoria geral das condições operativas, obtida pela inserção do equipamento.

O algoritmo primal-dual de Pontos Interiores é usado na resolução do problema FPO. O desempenho do algoritmo é analisado com os equipamentos FACTS operando livremente e em suas capacidades máximas. São analisados resultados de simulações com diferentes sistemas teste.

**Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.**

**Modeling Second Generation FACTS Devices in the Optimal Power Flow Problem**

**Danilo Dupin da Silva**

December/2008

Advisor: Katia Campos de Almeida, Ph.D.

Area of Concentration: Energy Systems.

Keywords: Second Generation FACTS Devices, Optimal Power Flow, Steady State Analysis, Security Region.

Number of Pages: xvi + 113.

This work presents detailed models for representing FACTS devices based on voltage source converters in the Optimal Power Flow (OPF) problem. The objective is to assess the impact of such equipments in the steady state operation of power systems. Three devices are analyzed: the STATCOM (Static Synchronous Compensator), the SSSC (Static Synchronous Series Compensator) and the UPFC (Unified Power Flow Controller).

To assess the FACTS devices potential, first of all, a study is carried out to determine the best location for the devices in the system. This is obtained using sensitivity factors provided by the OPF program. Next, a comparative analysis is made of the Steady State Security Region of the system with and without introducing the devices. The increase of such region indicates the overall improvement of the system operating conditions.

The primal-dual Interior Points method is used to solve the OPF problem. The performance of the method is analyzed considering different operating modes for the devices. Results are presented for different test systems.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Operação de Sistemas de Potência.....	1
1.1.1	Introdução.....	1
1.1.2	Limites na Operação em Regime Permanente.....	2
1.1.3	Problemas Operacionais em Regime Permanente .....	3
1.1.4	Limites na operação em Regime Dinâmico.....	4
1.2	Dispositivos Semicondutores.....	6
1.2.1	Diodos.....	7
1.2.2	Transistores.....	7
1.2.3	Tiristores.....	8
1.3	Equipamentos FACTS .....	9
1.3.1	Introdução.....	9
1.3.2	Equipamentos FACTS de Primeira Geração .....	10
1.3.3	Equipamentos FACTS de Segunda Geração .....	17
1.3.4	Desenvolvimento de Equipamentos e Instalações Existentes .....	19
1.4	Revisão Bibliográfica.....	20
1.5	Fluxo de Potência Ótimo.....	26
1.5.1	Introdução.....	26
1.5.2	Vantagens do Fluxo de Potência Ótimo .....	26
1.5.3	Variáveis, Função Objetivo e Restrições.....	27
1.5.4	Formulação do Problema.....	28
1.6	Organização do Trabalho .....	30
<b>2.</b>	<b>MODELAGEM DO STATCOM .....</b>	<b>31</b>
2.1	Introdução .....	31
2.2	Modelagem do VSC.....	31
2.3	Descrição do STATCOM.....	33
2.4	Utilização do STATCOM .....	35
2.5	Equações do STATCOM em Regime Permanente .....	39
2.6	Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo .....	41

2.7	Conclusões .....	43
<b>3.</b>	<b>MODELAGEM DO SSSC .....</b>	<b>44</b>
3.1	Introdução .....	44
3.2	Descrição do Equipamento .....	44
3.3	Utilização do SSSC .....	46
3.4	Equações do SSSC em Regime Permanente .....	53
3.5	Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo .....	56
3.6	Conclusões .....	60
<b>4.</b>	<b>MODELAGEM DO UPFC .....</b>	<b>61</b>
4.1	Introdução .....	61
4.2	Descrição do Equipamento .....	61
4.3	Utilização do UPFC .....	63
4.4	Equações do UPFC em Regime Permanente .....	67
4.5	Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo .....	71
4.6	Conclusões .....	76
<b>5.</b>	<b>USO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO NA ANÁLISE DO POTENCIAL DE EQUIPAMENTOS FACTS .....</b>	<b>77</b>
5.1	Introdução .....	77
5.2	Modelo Genérico de Fluxo de Potência Ótimo com FACTS .....	77
5.3	Índices de Sensibilidade para alocação de FACTS .....	78
5.4	Conceito de Regiões de Segurança .....	81
5.5	FACTS e Região de Segurança do Sistema .....	82
5.6	Conclusões .....	83
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>
6.1	Introdução .....	84
6.2	Desempenho do Método Primal-Dual de Pontos Interiores .....	84
6.3	Alocação de Equipamentos FACTS via Índices de Sensibilidade .....	87
6.3.1	Índice de Sensibilidade de Limites de Tensão .....	88
6.3.2	Índice de Sensibilidade de Limites de Fluxo .....	90



6.4	Impacto na Operação do Sistema.....	92
6.4.1	Caso Base de Estudo .....	92
6.4.2	STATCOM .....	93
6.4.3	SSSC.....	95
6.4.4	UPFC .....	97
6.5	Conclusões .....	99
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>104</b>
A.1	Formulação do Problema FPO com Equipamentos FACTS.....	104
A.2	Função Objetivo de Maximização de Transferência de Potência.....	106
	<b>APÊNDICE B – RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO .....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>

# Lista de Figuras

1.1	Sistema de Transmissão em Malha.....	03
1.2	Sistema de Transmissão com linhas Paralelas.....	04
1.3	Critério das áreas iguais.....	05
1.4	Linha de transmissão.....	09
1.5	Reator controlado a tiristores e capacitor chaveado a tiristores.....	10
1.6	Compensador estático de reativos.....	11
1.7	Sistema com SVC.....	12
1.8	Sistema com SVC operando com $B_s^{max}$ .....	13
1.9	Transformação Y - $\Delta$ para o SVC operando com $B_s^{max}$ .....	13
1.10	Potência transmitida com SVC.....	14
1.11	Capacitor série controlado ou chaveado a tiristor.....	15
1.12	Linha compensada com TCSC.....	15
1.13	Potência ativa e reativa com TCSC.....	17
2.1	Conversor CC-CA.....	32
2.2	Compensador Estático de Reativos.....	33
2.3	Característica $V_x I$ e $V_x Q$ do STATCOM.....	34
2.4	Sistema com STATCOM.....	35
2.5	Potência transmitida com o STATCOM.....	37
2.6	Critério das áreas iguais para o sistema não compensado.....	38
2.7	Critério das áreas iguais para o sistema com STATCOM.....	39
2.8	STATCOM.....	39
3.1	Representação esquemática do SSSC.....	45

3.2	Sistema de transmissão com SSSC.....	46
3.3	Transferência de potência ativa com SSSC em função de $E_s$ .....	48
3.4	Transferência de potência reativa com SSSC em função de $E_s$ .....	49
3.5	Relação $V \times I$ do SSSC.....	50
3.6	Critério das áreas iguais para o sistema não compensado.....	52
3.7	Critério das áreas iguais para o sistema com SSSC.....	52
3.8	Circuito equivalente do SSSC.....	53
4.1	Representação esquemática do UPFC.....	62
4.2	Sistema com UPFC.....	63
4.3	Transferência de potência ativa com UPFC em função de $\delta$ .....	65
4.4	Transferência de potência reativa com UPFC em função de $\delta$ .....	65
4.5	Circuito equivalente do UPFC.....	67
6.1	Sistema Sul Equivalente de 32 Barras.....	89
6.2	Perfil de tensão do sistema de 32 barras – Caso base e com STATCOM.....	90
6.3	Área Sudeste do Sistema Sul Equivalente de 107 Barras.....	92
6.4	Comparação de transferência de potência.....	99

# Lista de Tabelas

1.1	Instalações de Equipamentos FACTS de Primeira Geração.....	19
1.2	Instalações de Equipamentos FCATS de Segunda Geração.....	20
6.1	Desempenho do FPO com STATCOM.....	85
6.2	Desempenho do FPO com SSSC.....	85
6.3	Desempenho do FPO com UPFC.....	86
6.4	Desempenho do FPO com STATCOM para variação de $\mu$ e $\beta$ .....	86
6.5	Desempenho do FPO com SSSC para variação de $\mu$ e $\beta$ .....	87
6.6	Desempenho do FPO com UPFC para variação de $\mu$ e $\beta$ .....	87
6.7	Multiplicadores de Lagrange de Restrições de Limites de Tensão.....	88
6.8	Transferência de Potência Sistema Sul de 32 Barras.....	91
6.9	Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base.....	93
6.10	Multiplicadores de Lagrange de Tensões.....	93
6.11	Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com STATCOM.....	94
6.12	Variáveis e Injeções do STATCOM no Ponto Ótimo.....	94
6.13	Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com SSSC.....	96
6.14	Variáveis e Injeções do SSSC no Ponto Ótimo.....	96
6.15	Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com UPFC.....	97
6.16	Variáveis e Injeções do Conversor em Série no Ponto Ótimo.....	98
6.17	Variáveis e Injeções do Conversor em Derivação no Ponto Ótimo.....	98

# Lista de Siglas

CSC	Convertible Series Compensator
FACTS	Flexible AC Transmission System
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
GCT	Gatte-Commutated Thyristor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
GUPFC	Generalized Unified Power Flow Controller
IGCT	Integrated Gatte-Commutated Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPFC	Interline Power Flow Controller
MCT	MOS-Controlled Thyristor
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM	Pulse Width Modulation
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter

# Lista de Símbolos

$nb$	Número de barras do sistema
$nl$	Número de linhas de transmissão do sistema
$\mathbf{a}$	Vetor de tap's de transformadores LTC,s com dimensão $(nl \times 1)$
$\mathbf{b}$	Vetor de susceptância shunt variável com dimensão $(nb \times 1)$
$B_s^{\max}$	Susceptância máxima do SVC
$\dot{E}_s$	Tensão do SSSC ou conversor em série com a linha do UPFC
$\mathbf{fl}$	Vetor de fluxos nas linhas de transmissão com dimensão $(nl \times 1)$
$I_c^{\max}$	Máxima corrente capacitiva injetada pelo STATCOM
$I_{cc}$	Corrente elétrica interna do VSC
$\dot{I}_s$	Corrente injetada no STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
$\dot{I}_{km}$	Corrente no SSSC ou conversor série do UPFC
$k_s$	Ganho do conversor do STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
$k_{ss}$	Ganho do conversor do SSSC ou VSC série do UPFC
$m_s$	Faixa de modulação do controlador PWM do STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
$m_{ss}$	Faixa de modulação do controlador PWM do SSSC ou VSC em série do UPFC
$nupfc$	Número de UPFC's inseridos no sistema
$nstat$	Número de STATCOM's inseridos no sistema
$nsssc$	Número de SSSC's inseridos no sistema
$\mathbf{ps}$	Vetor de perdas de potência ativa do STATCOM ou conversor em derivação do UPFC com dimensão $(nb \times 1)$
$\mathbf{p}^{\text{esp}}$	Vetor de potência ativa especificada para o SSSC ou UPFC de dimensão $(nb \times 1)$
$\mathbf{p}_{\text{UPFC}}$	Vetor de potência ativa injetada pelo UPFC de dimensão $(nb \times 1)$
$\mathbf{p}_{\text{SSSC}}$	Vetor de potência ativa injetada pelo SSSC de dimensão $(nb \times 1)$

<b>pg</b>	Vetor de potência ativa gerada com dimensão $(nb \times 1)$
<b>pd</b>	Vetor de demanda de carga ativa com dimensão $(nb \times 1)$
$p_{cc}$	Perdas internas do VSC do STATCOM, SSSC e VSC em derivação do UPFC
$p_{ccs}$	Perdas internas do VSC em série do UPFC
<b>qg</b>	Vetor de potência reativa gerada com dimensão $(nb \times 1)$
<b>qd</b>	Vetor de demanda de carga reativa com dimensão $(nb \times 1)$
<b>q<sup>esp</sup></b>	Vetor de potência reativa especificada para o UPFC de dimensão $(nb \times 1)$
<b>q<sub>UPFC</sub></b>	Vetor de potência reativa injetada pelo UPFC de dimensão $(nb \times 1)$
<b>q<sub>SSSC</sub></b>	Vetor de potência reativa injetada pelo SSSC de dimensão $(nb \times 1)$
$r_c$ e $r_p$	Resistências que representam as perdas internas do VSC
<b>V</b>	Vetor de magnitude de tensão com dimensão $(nb \times 1)$
$V_c$	Magnitude da tensão no capacitor do VSC.
$V_{cc}$	Magnitude da tensão do lado CC do VSC em derivação do STATCOM ou UPFC
$V_{ccs}$	Magnitude da tensão do lado CC do VSC em série do SSSC ou UPFC
$\dot{V}_s$	Tensão nos terminais do STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
<b>V<sup>esp</sup></b>	Vetor de tensão de referência especificada para o STATCOM ou VSC em derivação do UPFC com dimensão $(nb \times 1)$
$\dot{V}_{ef}$	Tensão nos terminais do UPFC
$x_{sl}$	Inclinação da reta que representa a faixa de controle linear de tensão da barra $k$ conectada com o STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
$x_{eq}$	Reatância equivalente da linha de transmissão com SVC operando no limite
$x_{ef}$	Reatância equivalente da linha de transmissão compensada com TCSC
$\dot{Z}_s$	Impedância do transformador de acoplamento do STATCOM ou SSSC à rede
$\dot{Z}_{ss}$	Impedância do transformador de acoplamento do VSC série do UPFC à rede
<b>δ</b>	Vetor de ângulo de tensão com dimensão $(nb \times 1)$

$\Psi$	Ângulo da tensão do STATCOM ou VSC em derivação do UPFC
$\Psi_s$	Ângulo da tensão do SSSC ou VSC em série do UPFC
$\underline{\pi}_{Vi}$	Multiplicador de Lagrange referente restrição de limite mínimo de tensão na barra $i$
$\overline{\pi}_{Vi}$	Multiplicador de Lagrange referente à restrição de limite máximo de tensão na barra $i$
$\underline{\pi}_{flj}$	Multiplicador de Lagrange referente à restrição de limite mínimo de fluxo na linha $j$
$\overline{\pi}_{flj}$	Multiplicador de Lagrange referente à restrição de limite máximo de fluxo na linha $j$



# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Operação de Sistemas de Potência

#### 1.1.1 Introdução

Com o desenvolvimento econômico de diversos países nos últimos anos, a demanda por energia elétrica tem aumentado de forma significativa. Para que este desenvolvimento não seja afetado, a indústria de energia elétrica necessita crescer na mesma proporção para atender seus consumidores dentro de critérios satisfatórios e obrigatórios.

A construção de novas linhas de transmissão, usinas geradoras de energia elétrica e a re-estruturação dos equipamentos em operação são medidas necessárias para atender tais critérios. Porém, a construção de novas linhas de transmissão e usinas são sempre muito questionadas por segmentos da sociedade preocupados com o meio ambiente e também existe uma tendência de adiar novos investimentos e utilizar ao máximo a rede de transmissão atual devido às restrições econômicas e de áreas disponíveis para tais investimentos (Gama e Silveira, 1995; Zhang, 2003; Verma e Gupta, 2006).

Considerando que as soluções convencionais (construção de novas linhas e usinas) para o aumento da capacidade de fornecimento de energia sofrem grandes obstáculos, existe há muitos anos o empenho em pesquisar novas tecnologias para empregar em equipamentos capazes de aumentar a capacidade de carregamento e de transferência de potência dos sistemas existentes de uma maneira rápida e econômica.

Dentre essas novas tecnologias pesquisadas está o conceito de FACTS (Flexible AC Transmission System), que são sistemas baseados no uso intensivo de Eletrônica de Potência com o objetivo de obter sistemas CA com alto nível de flexibilidade (Hingorani, 1988). Com o uso desses equipamentos busca-se otimizar o uso dos recursos de transmissão disponíveis.

Para avaliar o impacto dos equipamentos FACTS na operação de sistemas de potência em regime permanente, é necessário introduzir modelos detalhados para os equipamentos em ferramentas computacionais que analisam a operação. A ferramenta escolhida neste trabalho para analisar o potencial desses equipamentos é o Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Tal escolha foi feita porque o FPO provê uma medida quantitativa do impacto dos equipamentos na segurança da operação em regime permanente.

A seguir, nas seções 1.1.2 e 1.1.3, são apresentados as principais limitações e os problemas operacionais em regime permanente. Na Seção 1.1.4, são resumidas brevemente as limitações em regime dinâmico que restringem o uso dos sistemas de potência. A Seção 1.2 apresenta uma abordagem sobre os principais dispositivos de eletrônica de potência que são utilizados nos equipamentos FACTS. Posteriormente, na Seção 1.3.1, é apresentada uma breve introdução sobre equipamentos FACTS. Logo após, a definição de equipamentos FACTS de primeira e segunda geração são apresentadas nas seções 1.3.2 e 1.3.3, e as instalações atualmente existentes desses equipamentos são mostradas na Seção 1.3.4. Na Seção 1.4 é feita a revisão bibliográfica mostrando estudos e trabalhos mais relevantes já publicados na área de equipamentos FACTS, incluindo trabalhos baseados na mesma ferramenta usada nesta dissertação: o FPO. O modelo genérico de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é descrito na Seção 1.5 a fim de ser utilizado para demonstrar o potencial dos equipamentos FACTS modelados neste trabalho.

### 1.1.2 Limites na Operação em Regime Permanente

Na operação de sistemas elétricos de potência em regime permanente, diversos limites têm que serem respeitados, tais como os descritos a seguir (Almeida e Silveira, 2006).

- Tensão nos pontos de entrega de energia: Os equipamentos que utilizam energia elétrica são projetados para serem usados em suas respectivas tensões nominais. A redução da vida útil e um mau funcionamento ocorrem quando operados fora destes valores;
- Capacidade dos equipamentos do sistema: Geradores, compensadores síncronos, transformadores, bancos de capacitores e reatores, isoladores, compensadores estáticos e outros equipamentos que fazem parte dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica possuem seus respectivos limites nominais para evitar danos aos seus enrolamentos e isolantes;

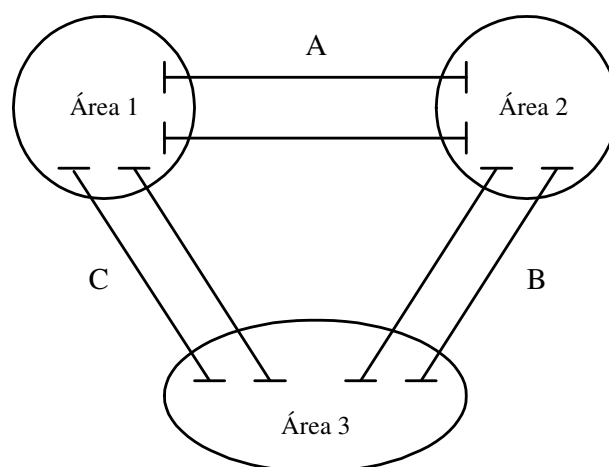
- Fluxo de potência nas linhas de transmissão: Correntes elevadas por períodos longos em linhas aéreas de transmissão diminuem a distância entre os condutores e a terra e com isso as margens de segurança. Cabos subterrâneos podem ter a isolamento danificada caso sejam sobrecarregados;
- Variação de tensão nas barras da rede: As correntes elevadas que fluem nas linhas de transmissão podem causar quedas de tensão inaceitáveis devido às perdas de potência reativa prejudicando o funcionamento dos equipamentos das empresas de energia e dos consumidores.

Além das limitações citadas, referentes a equipamentos que compõem os sistemas de transmissão e geração de energia elétrica, problemas operacionais também podem limitar a capacidade de carregamento do sistema.

### 1.1.3 Problemas Operacionais em Regime Permanente

Devido aos sistemas serem muito malhados, a presença de fluxos em malha e fluxos paralelos muitas vezes fazem com que os limites citados anteriormente sejam violados, mesmo com o sistema em operação com carga próxima a nominal.

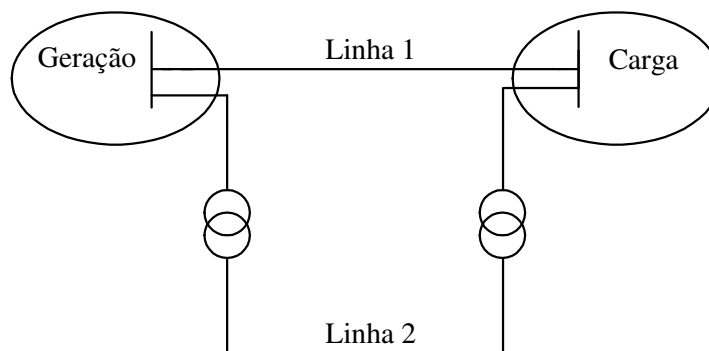
A Figura 1.1 ilustra um problema em que a configuração do sistema em malha limita a transferência de potência para suprir a carga de uma determinada área. Sendo a carga da Área 1 suprida pela geração da Área 2, devido à estrutura malhada do sistema, parte da energia entregue a Área 1 circulará pela Área 3.



*Figura 1.1 – Sistema de Transmissão em Malha.*

Com o aumento na demanda de energia na Área 1, maior fluxo de potência irá circular pelas linhas dos circuitos B e C. Se esses circuitos já estiverem operando perto dos seus respectivos limites poderá ocorrer sobrecarga nestes circuitos. Esse é um caso que mesmo com folga de transmissão nos circuitos que interligam a Área 1 e a Área 2, a transferência de potência fica limitada.

Linhas de transmissão paralelas com reatâncias e níveis de tensão diferentes geram limitações de transferência de potência quando a linha de menor capacidade fica sobrecarregada. No sistema da Figura 1.2, caso a linha 2 atinja o limite, a geração não poderá aumentar mesmo que haja folga de transmissão na linha 1.



*Figura 1.2 – Sistema de Transmissão com linhas Paralelas.*

Em ambos os casos, há necessidade de redirecionar o fluxo de potência para as linhas de maior capacidade, aliviando os circuitos sobrecarregados e aumentando a capacidade do sistema.

Sistemas com centros de carga distantes das unidades geradoras necessitam de extensas linhas de transmissão. Os fluxos de potência nesses circuitos absorvem grande quantidade de potência reativa e problemas de controle de tensão ocorrerão com o esgotamento desse recurso.

Além de limites na operação em regime permanente, a capacidade de transmissão de um sistema é restringida por limites na operação em regime dinâmico, como será visto a seguir.

#### 1.1.4 Limites na operação em Regime Dinâmico

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a diversas variações durante a operação que tiram o sistema da operação em regime permanente. Essas variações incluem perdas de linhas de transmissão, equipamentos ou grandes variações de carga que perturbam o sistema. As limitações

em regime dinâmico incluem problemas de estabilidade angular e estabilidade de tensão (Kundur, 1994).

O problema de estabilidade angular está associado ao comportamento do ângulo dos geradores. O problema de estabilidade angular é classificado em estabilidade transitória e estabilidade para pequenas perturbações.

A estabilidade transitória é associada à capacidade dos geradores síncronos de permanecerem em sincronismo após grandes perturbações. A instabilidade transitória é causada pelo desequilíbrio entre a potência mecânica de entrada e a potência elétrica de saída do gerador. Esse desequilíbrio tende a acelerar ou desacelerar a máquina síncrona em relação aos demais geradores, podendo provocar a perda de sincronismo. A Figura 1.3 mostra em detalhes o problema de estabilidade transitória para o caso de uma máquina conectada a uma barra infinita e como esse fenômeno limita o uso do sistema.

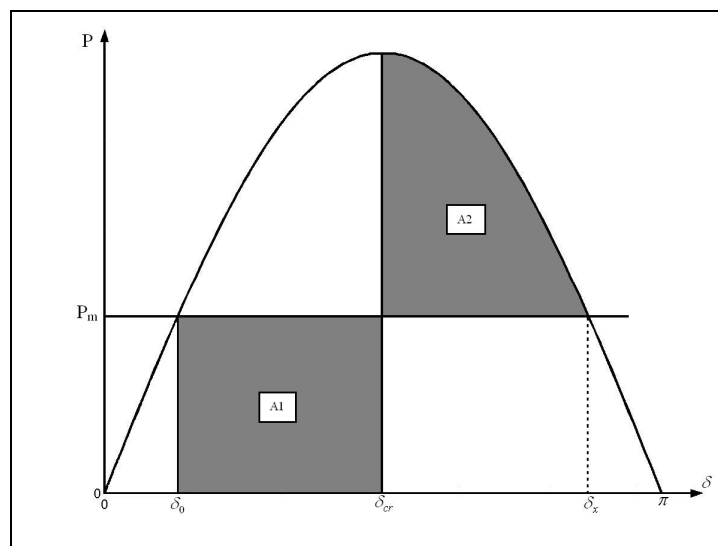


Figura 1.3 – Critério das áreas iguais

A condição inicial de operação corresponde ao ângulo  $\delta_0$ . Nesse instante, o sistema está em regime permanente e a potência mecânica da máquina primária é igual à potência elétrica de saída do gerador. Se uma falta ocorrer e a potência elétrica for zero, haverá uma potência acelerante correspondente à área A1. O ângulo máximo para a permanência da falta é  $\delta_{cr}$ . Se a falta permanecer até  $\delta_{cr}$  haverá uma área desacelerante A2, com  $A1=A2$  e o ângulo do gerador chegará no máximo a  $\delta_x$ . Se a falta for retirada depois de  $\delta_{cr}$  o ângulo do gerador passará de  $\delta_x$  e a máquina perderá o sincronismo. Com base nisso, o sistema precisa ter uma margem de estabilidade transitória de operação que corresponde à menor perturbação que leva o sistema à instabilidade e

não operar com ângulos de abertura de rotor inicial,  $\delta_0$ , elevados. Nos capítulos que descrevem os equipamentos FACTS será mostrado como a margem de estabilidade transitória é aumentada na presença desses equipamentos.

A estabilidade para pequenas perturbações envolve a habilidade do sistema em se manter em sincronismo depois de ter sido submetido a um pequeno distúrbio e é caracterizado pela magnitude e duração das oscilações do sistema. Os fatores associados a problemas dessa natureza envolvem geradores conectados a centros de carga através de linhas longas e de alta impedância e elevados carregamentos, implicando em ângulos de operação dos geradores elevados e reguladores de tensão rápidos, com elevados ganhos. Estas condições tendem a degradar o amortecimento do sistema, levando a amortecimentos negativos e a oscilações crescentes com o tempo (Mello e Concórdia, 1969).

Problemas associados à estabilidade de tensão são impostos pelo esgotamento de fontes de potência reativa durante um longo período de tempo, ou demandas de potência reativa por cargas durante transitórios rápidos, que provocam subtensões. Fontes de potência reativa podem evitar problemas de instabilidade de tensão e permitir maior carregamento do sistema (Almeida e Silveira, 2006).

Dentro do que foi exposto, as limitações em regime permanente mais restritivas são de fluxo de potência nas linhas de transmissão e de tensão nas barras. O controle sobre tais fluxos e tensões se tornou desejável levando ao estudo de novos equipamentos com esta capacidade. Os problemas associados a regime dinâmico podem ser resolvidos com a utilização de equipamentos que aumentam a margem de estabilidade angular e de estabilidade de tensão. Neste cenário, entra o conceito de FACTS, que são sistemas nos quais se empregam extensivamente equipamentos baseados em eletrônica de potência (Hingorani e Gyugyi, 2000).

Com estes equipamentos, busca-se aumentar o desempenho e a margem de segurança da operação e obter assim, uma maior capacidade de carregamento dos sistemas de transmissão.

A seguir, são apresentados os principais dispositivos semicondutores utilizados na construção dos equipamentos FACTS.

## 1.2 Dispositivos Semicondutores

Os equipamentos FACTS são baseados na construção de conversores CA-CC e chaves de alta potência. Os dispositivos eletrônicos utilizados para a construção desses conversores e chaves

são constituídos de diodos, transistores e tiristores com capacidades nominais de 1 a 5 kA e 5 a 10 kV por dispositivo. Esses dispositivos são conectados em série ou paralelo para conseguir o equipamento FACTS desejado. O progresso dos dispositivos de eletrônica de potência contribui para a criação de equipamentos FACTS com maior capacidade de controle, potência nominal e performance com menores custos. Basicamente, os dispositivos eletrônicos de potência são chaves rápidas obtidas a partir de cápsulas de silicone de alta pureza projetadas para características específicas de chaveamento (Hingorani e Gyugyi, 2000). São descritos aqui alguns dispositivos usados nos equipamentos FACTS (Barbi, 2000).

### 1.2.1 Diodos

O diodo pertence à família de dispositivos com duas camadas de semicondutores com dopagens diferentes e condução unidirecional. Não possui gatilho para controle da condução e conduz corrente somente quando polarizado diretamente (anodo positivo em relação ao catodo). O diodo é o componente indispensável para muitos equipamentos FACTS.

### 1.2.2 Transistores

O transistor pertence à família de dispositivos com três camadas de semicondutores com dopagens diferentes. O transistor conduz quando o coletor for positivo em relação ao emissor e quando uma tensão de disparo ou sinal de corrente for aplicada a base. Se a tensão de base ou a corrente forem maiores do que o mínimo para o seu completo acionamento, o transistor conduz enquanto houver tensão entre catodo e anodo. Os transistores mais usados em equipamentos FACTS são listados a seguir.

#### a) IGBT

O transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) possui capacidade para alta tensão (3 a 5 kV) e alta corrente e pouca queda de tensão durante a condução. As vantagens do IGBT para aplicações em potências elevadas estão em possuir poucas perdas, rapidez de chaveamento e limite de corrente elevado. É um dispositivo que possui grande importância para os equipamentos FACTS.

### b) MOSFET

O MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) é indicado para uso em baixas tensões e possui alta capacidade de condução e bloqueio. Possui baixas perdas de energia, sendo controlado por sua porta através do campo elétrico.

## 1.2.3 Tiristores

O tiristor pertence à família de dispositivos com quatro camadas de semicondutores com dopagens diferentes. São os dispositivos mais importantes para os equipamentos FACTS. Comparado ao transistor, tem capacidade de chaveamento inferior, em relação à velocidade, e maiores perdas decorrentes desses chaveamentos. Porém, possui menores perdas de condução e maior capacidade nominal de potência e tensão (8 a 10 kV).

O tiristor entra em condução quando o anodo estiver positivo em relação ao catodo e uma tensão de disparo ou sinal de corrente for aplicada ao gatilho. No tiristor convencional não há controle da interrupção da corrente. A corrente é interrompida apenas quando passa por zero.

### a) GTO

O GTO (Gate Turn-Off Thyristor) é semelhante ao tiristor convencional, porém além da corrente ser interrompida na passagem por zero, o GTO pode ter a corrente interrompida quando um pulso de desligamento for aplicado na porta no sentido reverso.

### b) IGCT e GCT

O IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) ou GCT (Gate-Commutated Thyristor) é um GTO que possui elevada rapidez de comutação, possível devido a um elevado pulso de corrente aplicado em sua porta. Esse pulso é de curta duração e minimiza o consumo de energia no acionamento, podendo ser reduzido em até cinco vezes em relação ao GTO.

### c) MCT

O MCT (MOS-Controlled Thyristor) incorpora a estrutura tipo MOSFET num dispositivo com capacidade de chaveamento. Essa estrutura resulta num acionamento rápido com perdas mais baixas do que outros dispositivos baseados em tiristores. Sendo um dispositivo de baixas perdas durante a condução, é ideal para os conversores de alta potência.

A seguir são apresentados os equipamentos FACTS baseados nos dispositivos de eletrônica de potência descritos nesta seção.



## 1.3 Equipamentos FACTS

### 1.3.1 Introdução

O conceito de FACTS foi criado por Narain Hingorani (1988), que propôs o uso da Eletrônica de Potência com a idéia de obter sistemas CA com alto nível de flexibilidade. Esse conceito tinha em vista um controle rápido e eficiente do fluxo de potência em linhas de transmissão através do controle de parâmetros que influenciam no fluxo das linhas, tais como tensão e ângulo das barras e impedância série das linhas. Estudos indicam que tais equipamentos têm potencial de melhorar significativamente as condições operativas dos sistemas de transmissão (Taranto et al., 1992; Gama e Silveira, 1995; Oliveira et al., 2000). Esses equipamentos são utilizados com soluções tradicionais, tais como compensação fixa em série ou shunt, de forma a complementar o sistema e melhorar o seu desempenho.

O impacto dos equipamentos FACTS na rede elétrica pode ser entendido através da análise do fluxo em uma linha de transmissão da rede. O fluxo de potência ativa entre as barras do sistema mostrado na Figura 1.4 é expresso por:

$$P = \frac{EV \sin(\delta)}{x} \quad (1.1)$$

sendo

$E$  a magnitude da tensão da barra de origem do fluxo de potência ativa;

$V$  a magnitude da tensão da barra de destino do fluxo de potência ativa;

$\delta$  o ângulo de tensão da barra com magnitude de tensão  $E$ ;

$x$  a reatância da linha de transmissão.

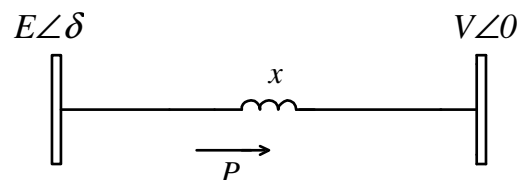


Figura 1.4 – Linha de transmissão.

Pela Equação (1.1) pode-se concluir que a capacidade de transmissão da linha é proporcional às magnitudes de tensão, diferença angular entre as barras e inversamente proporcional a reatância da linha.

Os equipamentos FACTS atuam no controle das tensões das barras, defasagem angular e na variação da compensação série das linhas de transmissão. Obter certo grau de flexibilidade, rápido e eficiente, sobre essas variáveis é o princípio básico dos equipamentos FACTS. Com esse controle, aumentar ou diminuir a potência transmitida se torna possível de maneira a se alcançar o desempenho desejado.

De acordo com a estrutura desses equipamentos são classificados como equipamentos de primeira e segunda geração, conforme a descrição de cada equipamento a seguir.

### 1.3.2 Equipamentos FACTS de Primeira Geração

Os equipamentos FACTS de Primeira Geração são caracterizados por serem constituídos por reatores chaveados a tiristores (Hingorani e Gyugyi, 2000). Esses dispositivos são a base de formação dos equipamentos FACTS de primeira geração.

Dentre os dispositivos mais utilizados estão o reator controlado a tiristores (TCR – Thyristor-Controlled Reactor) e o capacitor chaveado por tiristores (TSC – Thyristor Switched Capacitor).

A Figura 1.5 apresenta o esquema do TCR e TSC conectados a uma barra de um sistema por meio de um transformador.

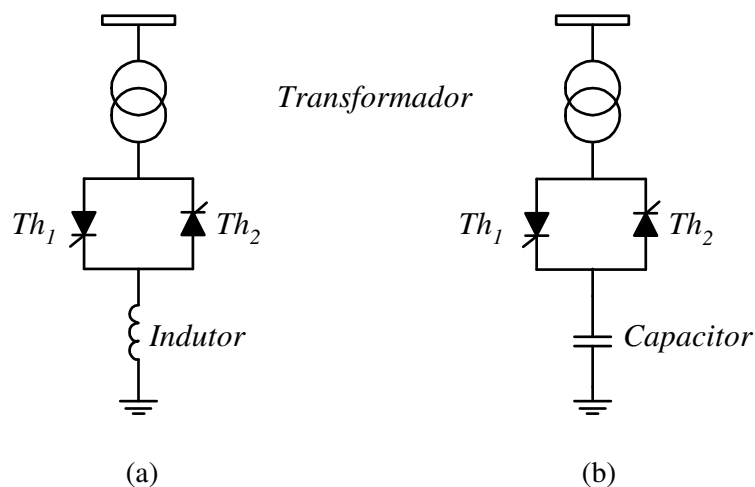


Figura 1.5 – (a) Reator controlado a tiristores e (b) capacitor chaveado a tiristores.

Através do controle adequado sobre os disparos dos tiristores de alta potência, obtém-se o valor necessário de injeção de potência reativa especificada para o sistema.

A seguir, é apresentada uma combinação dos dispositivos TCR e TSC formando os equipamentos FACTS de primeira geração mais utilizados, o SVC e o TCSC.

a) SVC

O Compensador Estático de Reativos (SVC – Static Var Compensator) é conectado como compensação fixa shunt no sistema. Sua função é semelhante à de um compensador síncrono, ou seja, fornecer suporte de potência reativa quando as condições de operação necessitarem deste recurso. Possui um bom e rápido controle sobre o perfil de tensão do sistema sem utilizar partes móveis, ao contrário de compensadores síncronos (Hingorani e Gyugyi, 2000).

O termo SVC pode ser utilizado para qualquer tipo de compensação reativa controlada a tiristores conectada em paralelo com as barras do sistema. Esta compensação pode ser formada por elementos que forneçam potência reativa indutiva (TCR) e capacitiva (TSC), ou uma combinação destes com uma reatância fixa ampliando sua faixa de operação conforme mostrado na Figura 1.6 (Machado, 2003).

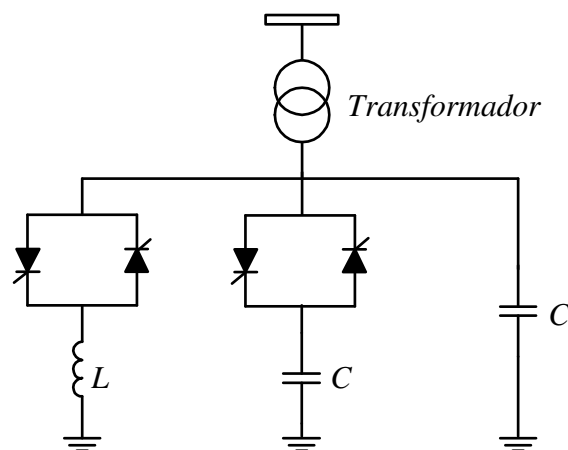


Figura 1.6 – Compensador estático de reativos.

A vantagem de chavear as reatâncias por tiristores está no fato de não haver limitações no número de manobras. Tais limitações ocorrem com chaveamentos mecânicos devido a problemas de desgastes em seus componentes. Em situações onde o controle de tensão precisa ser feito de forma rápida e eficiente, o emprego do SVC no lugar de banco de capacitores ou indutores se mostra bastante eficiente (Cigré, 1995).

O SVC não controla fluxo de potência ativa diretamente, mas como injeta potência reativa de acordo com as necessidades do sistema, contribui para manter as tensões em níveis adequados, aumentando a capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão. O controle de tensão tem sido sua aplicação mais comum (Almeida e Silveira, 2006).

Através da alocação de um SVC no meio da linha de transmissão do sistema mostrado na Figura 1.4 pode-se analisar o efeito na capacidade de transferência de potência na presença desse equipamento.

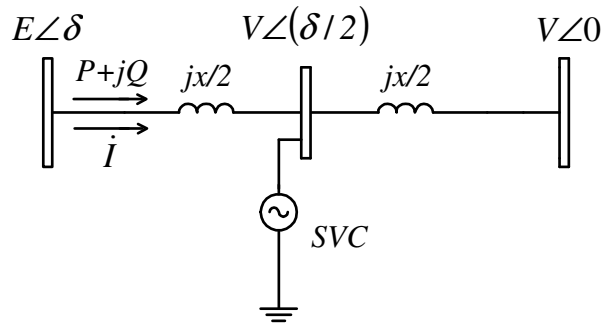


Figura 1.7 – Sistema com SVC.

A potência complexa que sai da barra com tensão  $E\angle\delta$  é calculada como:

$$\dot{S} = \dot{E} \dot{I}^* = E\angle\delta \frac{(E\angle\delta - V\angle\delta/2)^*}{(-jx/2)} = 2j \frac{[E^2 - EV\angle(\delta - \delta/2)]}{x} \quad (1.2)$$

$$\dot{S} = 2j \frac{[E^2 - EV\angle\delta/2]}{x} = \frac{2j}{x} [E^2 - EV\cos(\delta/2) - jEV\sin(\delta/2)] \quad (1.3)$$

$$\dot{S} = \frac{2}{x} EV\sin(\delta/2) + j \frac{2}{x} [E^2 - EV\cos(\delta/2)] \quad (1.4)$$

Considerando  $E=V$ , a potência ativa transmitida do sistema da Figura (1.7) com a introdução do SVC é dada por:

$$P = \frac{2}{x} E^2 \sin \frac{\delta}{2} \quad (1.5)$$

Observa-se que o compensador permite um aumento de 100% no valor máximo da potência ativa, porém a necessidade de potência reativa cresce rapidamente.

O SVC atua como uma susceptância variável controlada pelo disparo dos tiristores. Na operação normal, o SVC controla a susceptância associada à rede de acordo com a tensão terminal da barra ao qual está conectado. Nos limites de tensão ou susceptância o SVC se comporta como

um capacitor ou indutor fixo e a máxima transferência de potência é definida pelo valor da susceptância capacitiva máxima,  $B_s^{max}$ , e a potência ativa não pode ser mantida igual à anterior. Neste caso, o SVC operando livremente no sistema anterior torna-se:

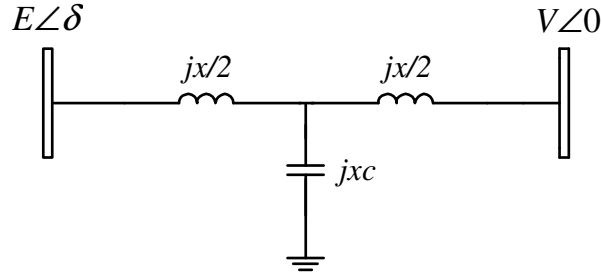


Figura 1.8 – Sistema com SVC operando com  $B_s^{max}$

sendo  $jxc$  o máximo valor da reatância capacitiva que o SVC pode operar.

A potência ativa transmitida depende da reatância equivalente da linha,  $x_{eq}$ . Fazendo uma transformação Y -  $\Delta$  tem-se:

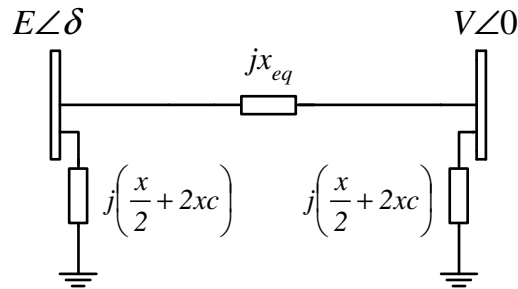


Figura 1.9 – Transformação Y -  $\Delta$  para o SVC operando com  $B_s^{max}$

$$x_{eq} = \frac{\frac{x^2}{4} + xc \, x}{xc} \quad (1.6)$$

ou ainda

$$x_{eq} = x \left( \frac{x}{4} \frac{1}{xc} + 1 \right) \quad (1.7)$$

Porém,  $1/xc = -B_s^{max}$  e a Equação (1.7) torna-se:

$$x_{eq} = x \left( 1 - \frac{x}{4} B_s^{max} \right) \quad (1.8)$$

e

$$P = \frac{VE}{x_{eq}} \sin \delta = \frac{VE}{x \left( 1 - \frac{x}{4} B_s^{max} \right)} \sin \delta \quad (1.9)$$

sendo  $x_{eq}$  a reatância equivalente entre as barras com a alocação do SVC.

Sendo assim, valores diferentes de  $B_s^{max}$  definem diferentes valores máximos de transferência de potência de acordo com a Figura 1.10, onde está plotada a curva ( $P \times \delta$ ) para o caso sem compensação, com o SVC livre e para diferentes valores de  $B_s^{max}$ .

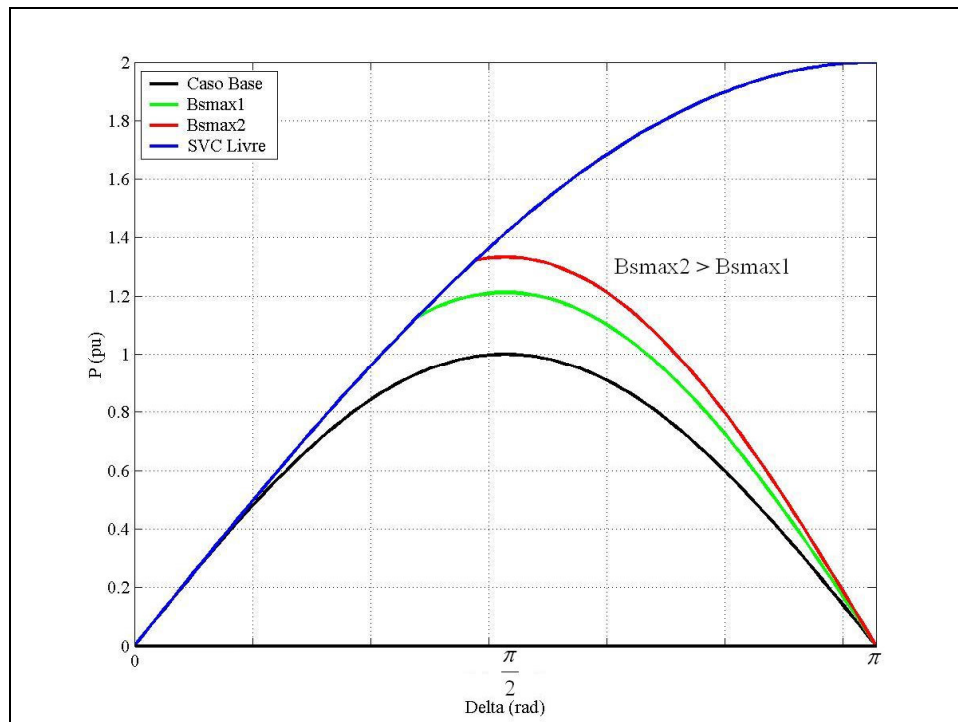


Figura 1.10 – Potência transmitida com SVC.

#### b) TCSC e TSSC

O capacitor série controlado a tiristor (TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor) ou chaveado a tiristor (TSSC – Thyristor Switched Series Capacitor) é composto por um capacitor em

série com a linha de transmissão. Em paralelo com o capacitor existe um reator variável que, controlado pelos disparos dos tiristores, varia a compensação da linha de transmissão (Figura 1.11).

De acordo com a maneira de variar a compensação, em degraus ou continuamente, são denominados de TSSC ou TCSC, respectivamente.

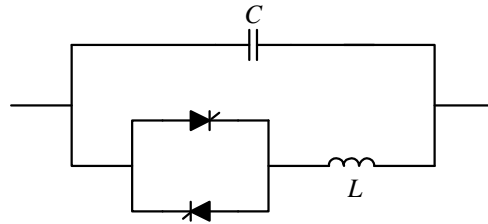


Figura 1.11 – Capacitor série controlado ou chaveado a tiristor.

Esses equipamentos são usados em regime permanente para variar a impedância série das linhas de transmissão, podendo aumentar ou diminuir a reatância série das linhas de acordo com o desempenho desejado. Com um controle adequado da impedância equivalente, o TCSC, ou TSSC, permite fixar a potência ativa das linhas em valores especificados.

Uma vez que permite controlar o fluxo de potência ativa, o TCSC pode ser usado para resolver problemas de fluxos paralelos e em malha, e com isto aumentar a capacidade de transferência de potência (Almeida e Silveira, 2006).

Através da compensação de uma linha de transmissão por um valor  $x_c$  de reatância capacitiva, mostrada na Figura 1.12, é analisada a influência do TCSC na capacidade de transmissão de potência ativa e reativa.

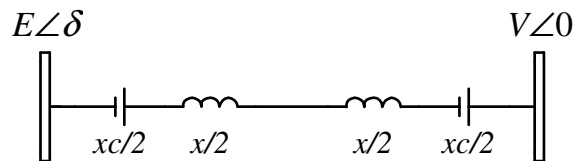


Figura 1.12 – Linha compensada com TCSC

A impedância equivalente da linha na presença do compensador torna-se:

$$x_{ef} = (1 - K)x \quad (1.10)$$

sendo  $K$  o grau de compensação da linha.

Com isso, o fluxo de potência ativa na linha torna-se

$$P = \frac{VE}{x_{ef}} \sin \delta = \frac{VE}{x(I-K)} \sin \delta \quad (1.11)$$

e a potência reativa fornecida pelo compensador é

$$Q_c = x_c I^2 \quad (1.12)$$

sendo  $x_c = K.x$  o valor de compensação adicionada a linha de transmissão.

A corrente que circula pela linha é calculada como:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{jx_{ef}} = \frac{\dot{E} - \dot{V}}{j(I-K)x} \quad (1.13)$$

$$\dot{I} = \frac{E \angle \delta - V \angle 0}{j(I-K)x} = \frac{-j}{(I-K)x} [E \cos \delta + jE \sin \delta - V] \quad (1.14)$$

Para  $V=E$  tem-se

$$\dot{I} = \frac{V}{(I-K)x} \sin \delta + j \frac{V}{(I-K)x} (I - \cos \delta) \quad (1.15)$$

e elevando a expressão (1.15) ao quadrado obtêm-se

$$I^2 = \frac{2V^2}{x^2(I-K)^2} [I - \cos \delta] \quad (1.16)$$

Substituindo a Equação (1.16) na Equação (1.12) obtêm-se a potência reativa fornecida pelo capacitor série expressa por

$$Q_c = \frac{2V^2 K}{x(I-K)^2} (I - \cos \delta) \quad (1.17)$$

A Equação (1.11) mostra que a potência ativa aumenta rapidamente variando-se a taxa de compensação série entre os limites  $0 < K < 1$ . Da mesma forma, a potência reativa fornecida pelo TCSC cresce rapidamente, conforme a Equação (1.17). A Figura 1.13 mostra a curva  $(P \times \delta)$  e  $(Q \times \delta)$  para diferentes valores de compensação  $K$ . Esta figura mostra que a relação entre o número de capacitores chaveados no TCSC e a modificação no fluxo de potência ativa é elevada, ressaltando a eficiência do equipamento nessa aplicação. Pela expressão (1.11) nota-se que o TCSC não é capaz de reverter o fluxo na linha, o que limita seu uso em algumas situações (Almeida e Silveira, 2006).



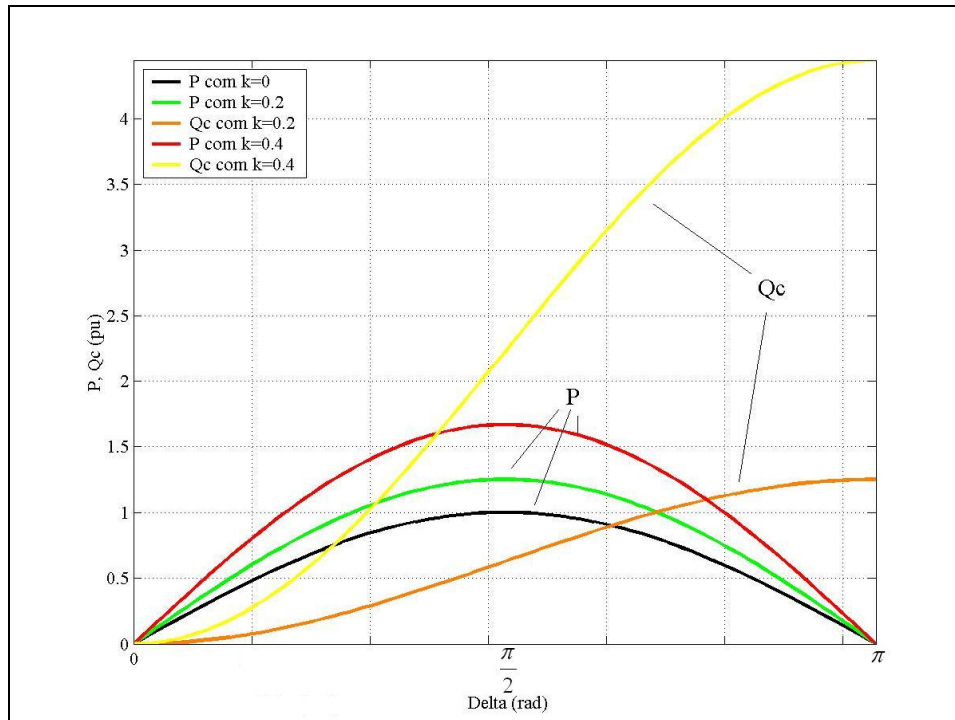


Figura 1.13 – Potência ativa e reativa com TCSC

No Brasil, equipamentos FACTS de primeira geração são utilizados desde a década de 80. Esses equipamentos possuem modelos consolidados, que se encontram já representados em programas computacionais usados por empresas do setor elétrico (Pereira, 2000).

Com o desenvolvimento dos dispositivos de eletrônica de potência foram criados novos equipamentos FACTS, que fazem parte da segunda geração desses equipamentos, conforme o exposto a seguir.

### 1.3.3 Equipamentos FACTS de Segunda Geração

Recentemente, foram desenvolvidos equipamentos que, em vez de utilizarem reatores chaveáveis, são compostos por conversores CC-CA (Voltage Source Converter – VSC). O VSC é um conversor que, a partir de uma fonte CC e de um inversor, produz, idealmente, tensões trifásicas senoidais na frequência fundamental, com a amplitude e ângulo de fase controláveis (Hingorani e Gyugyi, 2000; Watanabe et al., 2007).

Entre os equipamentos de segunda geração podem ser citados: o STATCOM (Static Synchronous Compensator), o SSSC (Static Synchronous Series Compensator), o UPFC (Unified Power Flow Controller), o IPFC (Interline Power Flow Controller) e o CSC (Convertible Series

Compensador). Vários desses equipamentos se encontram em operação atualmente. A modelagem dos equipamentos de segunda geração nas ferramentas de análise da operação é fundamental para que seu potencial seja averiguado.

O STATCOM, de forma semelhante ao SVC, é um equipamento conectado em paralelo no sistema e tem como principal função o controle de tensão através da injeção ou absorção de potência reativa controlada através da magnitude da tensão do VSC (Radman e Raje, 2006).

O SSSC, conectado em série com a linha de transmissão, pode ser utilizado com a mesma função do TCSC. Entretanto, o SSSC possui uma maior flexibilidade, permitindo o controle de uma das seguintes grandezas por vez: fluxo de potência ativa ou reativa, tensão e impedância série da linha (Zhang, 2003).

Com a combinação de dois ou mais VSC's, é possível a criação de outros equipamentos FACTS de segunda geração. O UPFC, formado por um conversor série e outro paralelo, tem a capacidade de controlar o fluxo de potência ativa e reativa, enquanto mantém a tensão em um valor especificado (Hingorani e Gyugyi, 2000).

Uma combinação de um VSC paralelo com dois ou mais conversores série formam o GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller), que tem a capacidade de controlar a tensão e o fluxo de potência ativa e reativa em diversas linhas de transmissão (Zhang, Handschin e Yao, 2001).

O IPFC, formado por dois conversores série, foi criado com a intenção de compensar um dado número de linhas que saem da subestação, aumentando a capacidade de transmissão das linhas. Neste caso, se a compensação série for fixa, através de TCSC ou de SSSC, não há meios de controlar o balanço de potência reativa entre as linhas. O IPFC permite a transferência direta de potência ativa entre as linhas compensadas. Essa capacidade permite a divisão da potência ativa e reativa entre as linhas de forma balanceada, compensa as quedas de tensão resistivas e a demanda de potência reativa (Hingorani e Gyugyi, 2000).

Utilizando dois conversores conectados por um elo CC, o CSC possui as funcionalidades do STATCOM, do SSSC, do UPFC e do IPFC de acordo com a combinação dos conversores (Wei et.al, 2004). Sendo assim, engloba todas as características dos equipamentos FACTS citados anteriormente.

Como será visto na próxima seção, os equipamentos FACTS de segunda geração são ainda muito pouco usados. O desenvolvimento de modelos detalhados para esses equipamentos em

ferramentas computacionais é fundamental para analisar suas potencialidades em corrigir problemas na operação de sistemas de potência.

#### 1.3.4 Desenvolvimento de Equipamentos e Instalações Existentes

O objetivo desta seção é mostrar as principais instalações com equipamentos FACTS usadas para a melhoria do desempenho em regime permanente e dinâmico de sistemas elétricos de potência.

Dentre os equipamentos FACTS de primeira geração, o SVC é o mais usado. Estima-se que exista um número superior a 800 SVC's instalados em todo o mundo (Almeida e Silveira, 2006). A situação não é a mesma para o TSSC e TCSC, pois o número de instalações desses equipamentos ainda é pequeno. A Tabela 1.1 indica o número de instalações desses equipamentos, a localização e o período de instalação e os objetivos com que foram construídos.

No caso dos equipamentos FACTS de segunda geração, verificou-se que o uso do STATCOM tem sido mais amplo que o UPFC e o CSC e que, no presente momento, não há informações sobre a utilização do SSSC e do IPFC. A Tabela 1.2 indica o número de instalações de equipamentos de segunda geração, a localização e o período em que foram construídos e os problemas a serem solucionados com o uso de cada equipamento (Almeida e Silveira, 2006).

*Tabela 1.1 – Instalações de Equipamentos FACTS de Primeira Geração*

<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Localização – Qdade de Equipamentos</b>	<b>Período de Instalação</b>	<b>Objetivos</b>
TSSC	1	Estados Unidos - 1	1992	Aumento da potência transmitida
TCSC	7	Brasil - 1 China - 2 Estados Unidos - 2 Índia - 1 Suécia - 1	Entre 1992 e 2004	Amortecimento de oscilações eletromecânicas Aumento da margem de estabilidade transitória Aumento da potência transmitida Controle de fluxo e maior carregamento Amortecimento de Ressonância subsíncrona

*Tabela 1.2 – Instalações de Equipamentos FACTS de Segunda Geração*

Tipo	Quantidade	Localização - Qdade de Equipamentos	Período de Instalação	Objetivos
STATCOM	11	Estados Unidos - 5 Dinamarca - 1 Inglaterra - 1 Japão - 4	Entre 1991 e 2004	Amortecimento de oscilações eletromecânicas Controle de fluxo e maior carregamento Aumento da potência transmitida Suporte de potência reativa Compensação reativa dinâmica
UPFC	2	Coréia do Sul - 1 Estados Unidos - 1	Entre 1992 e 2004	Suporte de tensão Redução de perdas Evitar sobrecargas Controle de fluxo
CSC	1	Estados Unidos - 1	2004	Aumento da potência transmitida Controle de tensão Controle de Var

De um modo geral, os equipamentos FACTS de segunda geração foram instalados com o objetivo de solucionar problemas decorrentes de falta de suporte de potência reativa nos sistemas e com isso proporcionar melhor controle de tensão, amortecimento, maior carregamento do sistema e controle de fluxo.

Esta seção mostra que o uso de equipamentos FACTS nos sistemas de transmissão é uma realidade. Como ainda são equipamentos caros (Almeida e Silveira, 2006), um grande empenho tem sido feito para analisar as vantagens de seu uso em comparação com a adoção de técnicas mais estabelecidas para o controle de sistemas elétricos. Tal análise tem sido feita através de simulações computacionais e, para tanto, modelos têm sido propostos para esses equipamentos, tanto para representar sua operação em regime permanente como em regime dinâmico.

Na próxima seção é feito uma breve revisão bibliográfica sobre os trabalhos já publicados sobre esses equipamentos.

## 1.4 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica está organizada da seguinte forma: Primeiramente é descrito um dos trabalhos pioneiros sobre o conceito FACTS. A seguir, são relacionados trabalhos que modelaram os equipamentos FACTS no problema de fluxo de carga. Posteriormente, são descritos trabalhos que analisaram o impacto desses equipamentos na operação em regime dinâmico. São então

descritos trabalhos sobre modelagem dos equipamentos FACTS no problema FPO. Alguns desses trabalhos usaram a ferramenta FPO para analisar o impacto dos equipamentos na operação segura dos sistemas. São destacados também estudos sobre a influência dos equipamentos FACTS no mercado de energia. Por fim, são descritos dois tutoriais importantes para se obter uma visão geral dos equipamentos e sobre a modelagem dos mesmos nas ferramentas computacionais de análise em regime permanente dos sistemas de potência.

Em 1993 o criador do conceito de sistemas de transmissão flexíveis, Narain G. Hingorani, publicou um trabalho com a finalidade de mostrar os efeitos e benefícios do uso de controladores baseados a tiristores em sistemas de potência com a aplicação em sistemas reais de transmissão. A idéia básica de Hingorani era de criar equipamentos com uma boa capacidade de controle sobre a impedância e a defasagem angular entre as linhas de transmissão (Hingorani, 1993). Esses equipamentos se mostraram mais eficientes que soluções alternativas, como o uso de transformadores defasadores, capacitores e reatores chaveados de forma mecânica, que são lentos e possuem limitações quanto ao número de chaveamentos devido aos seus componentes mecânicos e geram problemas de ressonância (Hingorani, 1993). Testes realizados comprovaram a capacidade do aumento na capacidade de transmissão de até 30% com o uso do TCSC em uma única linha de transmissão.

Inúmeros trabalhos sobre a representação dos equipamentos FACTS de segunda geração em ferramentas computacionais de análise de sistemas elétricos de potência têm sido publicados. Porém, a modelagem desses equipamentos é encontrada, na maioria das vezes, representadas no fluxo de carga convencional, tal como os trabalhos analisados a seguir.

A modelagem dos equipamentos FACTS de primeira geração, TCSC e SVC, em um programa de fluxo de potência trifásico formulado usando o método de injeção de corrente, mostrou que a utilização destes equipamentos na melhoria do perfil de tensão também em sistemas de distribuição é eficaz (Garcia, Pereira e Carneiro, 2000). Controle de tensão remoto ou local com FACTS foram simulados com eficiência através de modelos matemáticos de reguladores de tensão.

A introdução do SSSC, modelado de forma multi-controle no problema de fluxo de carga, mostrou a possibilidade de controle de potência ativa, reativa, de tensão e de impedância série de linha (Zhang, 2003).

O uso dos VSC's permitiu uma maior flexibilidade para se criar vários tipos de equipamentos de segunda geração, tal como o CSC da subestação de Marcy, em Nova York. Esse equipamento, com um chaveamento apropriado, pode operar em 11 maneiras diferentes de

compensação. Devido às várias alternativas de configuração dos controles, o CSC se mostrou eficaz para melhorar o perfil de tensão e aumentar a transferência de potência (Wei et.al, 2004).

Modelos detalhados do STATCOM, UPFC e SSSC puderam ser representados no problema de fluxo de carga através da modificação de termos existentes no jacobiano do problema sem equipamentos FACTS (Radman e Raje, 2006). Resultados numéricos em um sistema de 9 barras comprovaram a robustez da modelagem proposta, com um bom controle de tensão e aumento da capacidade de transferência de potência de até 10% em relação ao caso base.

Zhang e colaboradores (2006) propuseram uma modelagem detalhada do STATCOM para o problema de fluxo de carga. A modelagem considerou as perdas internas no equipamento e também dois tipo de controle para o VSC: PWM e controle de fase. Nesse trabalho, o método baseado em SVD (Singular Value Decomposition) foi usado para estudar os efeitos do STATCOM na estabilidade de tensão. Simulações feitas com os sistemas teste de 30 e 300 barras do IEEE comprovaram um significativo aumento na capacidade de carregamento do sistema com um melhor perfil de tensão na presença do STATCOM.

A utilização dos equipamentos FACTS não se restringe somente a corrigir problemas em regime permanente. Os próximos trabalhos obtiveram resultados satisfatórios atingindo ganhos na capacidade de transferência de potência de linhas de transmissão devido a uma melhoria na estabilidade transitória e amortecimento de oscilações eletromecânicas.

O uso do TCSC, para aumentar o intercâmbio entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil, se mostrou eficiente no controle de fluxo de potência e redução de oscilações eletromecânicas, adiando em até dois anos a construção de nova linha de transmissão em simulações feitas no trabalho de Gama e Silveira (1995).

Testes realizados em um equipamento de simulação de transitórios em redes comprovaram uma maior eficiência dos equipamentos FACTS em controlar o fluxo de potência de linhas de transmissão e prover maior estabilidade ao sistema em relação à compensação série convencional com a mesma capacidade de potência reativa (Gyugyi, Schauder e Sen, 1997).

Estudos de maximização de transferência de potência em linhas de transmissão utilizando uma modelagem detalhada do dispositivo de segunda geração UPFC foram apresentados em (J.Bian et.al, 1997). As simulações indicaram ganhos de até 100% na capacidade de transferência de potência do sistema testado, sem violar restrições de regime permanente e dinâmico.

A seguir são descritos alguns trabalhos sobre modelagem dos equipamentos FACTS no problema FPO, sendo que alguns desses trabalhos usam a ferramenta FPO para analisar o impacto dos equipamentos na operação segura dos sistemas.

Um modelo genérico de Fluxo de Potência Ótimo linearizado implementado em 1992 por Taranto, Pinto e Pereira, com a finalidade de corrigir problemas decorrentes de fluxos paralelos e fluxos de malha, obteve bons resultados no aumento da capacidade de transmissão em um sistema equivalente da Região Sul do Brasil (Taranto, Pinto e Pereira, 1992). Nesse trabalho, as variáveis modeladas para representar os equipamentos FACTS foram o ângulo de transformadores defasadores e a reatância variável de compensadores série. A combinação do FPO com a utilização desses equipamentos mostrou melhorias significativas no desempenho em regime permanente do sistema enquanto o índice de desempenho de minimização de custos de geração foi utilizado como função objetivo do problema.

Resultados numéricos comprovaram a eficiência do FPO, junto com os equipamentos FACTS de segunda geração, para manter a operação de sistemas em níveis seguros. O trabalho de Zhang, Handschin e Yao (2001) apresentou um modelo para a representação do GUPFC no problema FPO. O problema resultante foi resolvido pelo método primal-dual de pontos interiores. Os autores relataram resultados satisfatórios no controle de tensão e fluxo de potência.

O modelo linear do FPO foi empregado para determinar o melhor local para instalação do SSSC com o objetivo de aumentar a transferência de potência no trabalho de Menniti, Scordino e Sorrentino, (2006). O método proposto nesse trabalho primeiramente analisou um conjunto de linhas candidatas a instalação do SSSC no FPO. Posteriormente, as linhas que obtiveram o melhor desempenho com SSSC em relação à maximização de transferência de potência no FPO linear foram testadas em um problema de fluxo de carga AC para validar o melhor ponto de conexão do equipamento.

Recentemente, modelos detalhados do STATCOM e do SSSC foram introduzidos no problema de Fluxo de Potência Ótimo através da inserção de restrições não lineares e de canalização. O problema resultante foi resolvido de forma eficiente pelo método primal-dual de pontos interiores, observando-se pequenos acréscimos no número de iterações para a convergência. Índices de sensibilidade para alocação do STATCOM foram testados com eficiência para localização ótima desse equipamento. O trabalho relatou um significativo aumento de intercâmbio entre as regiões sul e sudeste do Brasil com o uso de equipamentos FACTS de segunda geração (Dupin e Almeida, 2008). Esta dissertação estende o estudo desse trabalho com a representação do UPFC no programa FPO.

O conceito de região de segurança foi definido para avaliar o impacto dos equipamentos FACTS na operação do sistema em regime permanente. Através do FPO pode-se avaliar a alteração na região de segurança do sistema com esses equipamentos. Simulações feitas através do Fluxo de Potência Ótimo parametrizado demonstraram que a utilização de equipamentos FACTS aumentou a capacidade de carregamento dos sistemas teste de 30 e 118 barras do IEEE comprovando o aumento na região de segurança provida por esses equipamentos (Galiana et al., 1996).

A região de segurança definida a partir das restrições de regime permanente e dinâmica foi usada para avaliar o impacto dos equipamentos FACTS, SVC e TCSC, na maximização de transferência de potência entre os sistemas sul e sudeste da Eletrosul. As soluções com equipamentos FACTS foram comparadas com soluções baseadas no uso de compensação série fixa e na construção de novos circuitos. A solução baseada no uso do TCSC se mostrou a mais efetiva, sendo mais econômica que a construção de novos circuitos e apresentando melhor desempenho que as demais soluções (Machado, Almeida e Silveira, 2004).

A alocação de equipamentos FACTS, além de solucionar problemas operacionais em sistemas de potência, também interfere no mercado de energia e em custos operacionais. Devido a isso, os trabalhos destacados a seguir mostram como tais equipamentos influenciam nessa questão.

Em sistemas hidrotérmicos, a limitação de fluxos em determinadas linhas de transmissão podem interferir nos custos operacionais do sistema ao limitar a capacidade de geração das usinas hidrelétricas. Com isso, para atender a demanda, as usinas térmicas precisam gerar mais energia, aumentando os custos de produção. Estudos feitos por Oliveira e colaboradores (2000) mostraram que a alocação de equipamentos FACTS pode eliminar possíveis congestionamentos que venham limitar a geração de usinas hidrelétricas e reduzir o custo total de energia.

A utilização de equipamentos FACTS para diminuir as restrições impostas pelas redes de transmissão também afeta diretamente as transações de mercado tipo Pool-Bilateral entre os agentes participantes do mercado. Simulações feitas mostraram que, ao serem eliminados congestionamentos da rede de transmissão, alguns participantes do mercado são beneficiados economicamente enquanto outros são prejudicados (Rothstein e Almeida, 2002).

Verma e Gupta (2006) fizeram um estudo da influência de equipamentos FACTS nos custos marginais de potência ativa e reativa. O trabalho foi feito com o auxílio de um programa FPO com a representação do UPFC.

Sendo assim, os resultados mostrados nos trabalhos anteriores indicam a necessidade de se realizar estudos detalhados sobre a influência de equipamentos FACTS no mercado de energia.



Os tutoriais a seguir são importantes para se obter uma visão geral dos equipamentos e sobre a modelagem dos mesmos nas ferramentas computacionais de análise de sistemas de potência.

Um trabalho apresentado sobre a forma de tutorial em 1998 representou detalhadamente modelos ideais de equipamentos FACTS e aspectos construtivos dos equipamentos de primeira geração, baseados a tiristores, e segunda geração, baseados em chaves autocomutadas e controle PWM (Watanabe et al., 1998). Um exemplo de aplicação em um sistema de três barras foi mostrado provando que a região de segurança utilizando equipamentos FACTS aumentou de forma significativa. A importância de localizar um melhor ponto para alocação destes equipamentos, para obter um melhor desempenho sem afetar o equilíbrio original do sistema, foi destacada nesse trabalho. Conceitos de controle dos equipamentos FACTS e estabilidade transitória também são expostos neste tutorial.

Modelos detalhados dos equipamentos FACTS de primeira geração, SVC e TCSC, foram propostos para o problema de fluxo de carga. O problema modificado foi solucionado pelo método de Newton Raphson com grande eficiência (Pereira, 2000). Neste trabalho foi apresentada uma técnica de alocação de equipamentos FACTS em redes de transmissão, para aliviar linhas com sobrecarga e evitar a construção de novos circuitos e conseqüentemente reduzir custos, baseado no redirecionamento de fluxos de potência utilizando a compensação série e otimizando o uso do sistema existente.

Esta dissertação estende os trabalhos de Zhang (2003) e de Zhang e colaboradores (2006). Ela introduz no problema FPO o modelo do STATCOM apresentado em (Zhang et al., 2006) e também extensões dos modelos do SSSC e UPFC apresentados em (Zhang, 2003). O objetivo é analisar o desempenho e o comportamento de tais equipamentos em regime permanente.

Nesta dissertação são apresentados também, critérios de alocação ótima para aumentar a transferência de potência e melhorar o perfil de tensão dos sistemas respeitando limites de segurança e operacionais.

Uma vez que este trabalho se baseia no uso de um programa computacional de Fluxo de Potência Ótimo para analisar o potencial dos equipamentos FACTS de segunda geração, a seguir o problema FPO é descrito com maiores detalhes.

## 1.5 Fluxo de Potência Ótimo

### 1.5.1 Introdução

A ferramenta de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) é muito útil na análise em regime permanente de sistemas de potência. Sua primeira formulação apareceu em 1962 (Carpentier, 1962).

O problema FPO pode ser definido como uma ferramenta matemática utilizada para encontrar o ponto ótimo de operação de um sistema de potência sujeito a restrições operacionais e de segurança (Carpentier, 1987). Com esta ferramenta consegue-se um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

O FPO tem sido amplamente usado no planejamento de sistemas de potência, reduzindo custos de geração, perdas de transmissão, desvios de tensão em relação a valores nominais e auxiliando na escolha de um ponto de operação que possua uma maior margem de segurança.

A modelagem dos equipamentos FACTS de segunda geração na ferramenta de FPO é de grande importância para avaliar o potencial de tais equipamentos na melhoria de critérios de desempenho do sistema.

### 1.5.2 Vantagens do Fluxo de Potência Ótimo

As principais vantagens da utilização do Fluxo de Potência Ótimo estão relacionadas a fatores de segurança e econômicos (Carpentier, 1985). Dentre as quais estão:

- respeitar limites de acordo com a capacidade nominal dos equipamentos;
- minimizar perdas de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, e como consequência reduzir custos de geração;
- melhorar o perfil de tensão do sistema com uma distribuição ótima de potência reativa;
- melhorar a estabilidade do sistema evitando níveis de tensão baixos;
- localizar pontos ideais para introduzir novos equipamentos a fim de conseguir um melhor desempenho destes;

- aumentar a capacidade de carregamento do sistema otimizando o uso dos sistemas de transmissão e geração de energia elétrica.

A seguir, é apresentada a formulação básica do problema FPO com os índices de desempenho, restrições e variáveis de otimização do sistema.

### 1.5.3 Variáveis, Função Objetivo e Restrições

Em sua formulação básica, o problema FPO genérico pode ser descrito matematicamente da seguinte forma:

$$\min F(\mathbf{x}) \quad (1.18)$$

sujeito a

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (1.19)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (1.20)$$

A função objetivo (1.18) pode representar diversos índices de desempenho que se necessitam otimizar respeitando-se as restrições de igualdade (1.19) e desigualdade (1.20). As restrições de igualdade, são compostas pelas equações não lineares de balanço de potência das barras e as restrições de desigualdade, representam os limites físicos e operacionais do sistema. As variáveis de otimização, representadas pelo vetor  $\mathbf{x}$  são, tradicionalmente,

- geração de potência ativa e reativa;
- taps de transformadores com comutação sobre carga e defasadores;
- magnitude das tensões nas barras;
- potência gerada por capacitores e reatores.

Com a criação dos equipamentos FACTS, novas variáveis podem ser incluídas, tais como:

- susceptância shunt de compensadores estáticos de reativos (SVC's);
- impedância de compensação série variável (TCSC's e TSSC's);
- controles dos equipamentos FACTS de segunda geração.

Os índices de desempenho representados na função objetivo do problema FPO podem ser maximizados ou minimizados. Entre os critérios que se desejam minimizar estão:

- perdas de potência ativa e reativa nas linhas transmissão;
- soma dos desvios quadráticos de tensão em relação a 1.0pu;
- custos de geração de potência ativa e reativa;
- desvio de potência ativa de um valor pré-especificado;
- número de controles alterados.

Como critérios de maximização os seguintes itens são destacados:

- carregamento do sistema;
- transferência de potência entre linhas de transmissão.

No atual cenário energético, e principalmente no Brasil, onde a prática de intercâmbio de energia entre os diversos agentes do sistema ocorre com frequência, devido aos níveis dos reservatórios serem diferentes nas diversas regiões do Sistema Interligado Nacional e também devido a motivos econômicos, a maximização de transferência de potência nas linhas de transmissão já existentes tornou-se necessária. A utilização da ferramenta de FPO, juntamente com a modelagem das novas tecnologias de equipamentos FACTS, apresenta-se como uma boa alternativa para conseguir tal objetivo.

A seguir, é apresentada a formulação do problema FPO original, sem os equipamentos FACTS de segunda geração, com todas as variáveis de otimização e restrições de igualdade e desigualdade que representam os sistemas de potência.

#### 1.5.4 Formulação do Problema

O problema genérico descrito pelas equações (1.18) a (1.20) pode ser ampliado para representar de forma mais detalhada as variáveis e restrições do sistema, passando a ser escrito como:

$$\min F \quad (1.21)$$

sujeito a

$$\mathbf{pg} - \mathbf{pd} - \mathbf{p}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) = \mathbf{0} \quad (1.22)$$

$$\mathbf{qg} - \mathbf{qd} - \mathbf{q}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) + \text{diag}(\mathbf{V}_i^2) \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (1.23)$$

$$\mathbf{qg}^{\min} \leq \mathbf{qg} \leq \mathbf{qg}^{\max} \quad (1.24)$$

$$\mathbf{fl}^{\min} \leq \mathbf{fl}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \leq \mathbf{fl}^{\max} \quad (1.25)$$

$$\mathbf{V}^{\min} \leq \mathbf{V} \leq \mathbf{V}^{\max} \quad (1.26)$$

$$\mathbf{b}^{\min} \leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}^{\max} \quad (1.27)$$

$$\mathbf{pg}^{\min} \leq \mathbf{pg} \leq \mathbf{pg}^{\max} \quad (1.28)$$

$$\mathbf{a}^{\min} \leq \mathbf{a} \leq \mathbf{a}^{\max} \quad (1.29)$$

sendo

$nb$  o número de barras do sistema;

$nl$  o número de linhas de transmissão do sistema;

$diag(V_i^2)$  matriz diagonal de dimensão  $(nb \times nb)$ ;

$\mathbf{V}$  o vetor de magnitude de tensão com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\boldsymbol{\delta}$  o vetor de ângulo de tensão com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{a}$  o vetor de tap's de transformadores LTC,s com dimensão  $(nl \times 1)$ ;

$\mathbf{pg}$  o vetor de potência ativa gerada com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{qg}$  o vetor de potência reativa gerada com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{pd}$  o vetor de demanda de carga ativa com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{qd}$  o vetor de demanda de carga reativa com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{b}$  o vetor de susceptância shunt variável com dimensão  $(nb \times 1)$ ;

$\mathbf{fl}$  o vetor de fluxos nas linhas de transmissão com dimensão  $(nl \times 1)$ ;

e os sobrescritos *min* e *max* representam o limite mínimo e máximo de cada variável, respectivamente.

Esta formulação, composta pelas equações (1.21)-(1.29), será modificada pela inserção das equações que representam os equipamentos FACTS de segunda geração modelados nesta dissertação.

Devido às vantagens do FPO citadas, esta ferramenta de análise em regime permanente é de grande utilidade para avaliar o potencial dos equipamentos FACTS de segunda geração no sistema sem violar as restrições operacionais desses equipamentos e tratar seus controles de forma eficiente. A seguir é apresentada a organização do trabalho com a descrição do conteúdo de cada capítulo.

## 1.6 Organização do Trabalho

Os demais capítulos que constituem esta dissertação estão organizados como descrito a seguir. Nos capítulos 2, 3 e 4 são apresentadas as modelagens do STATCOM, SSSC e UPFC, respectivamente. Inicialmente, é feita uma descrição genérica de cada equipamento. Em seguida são apresentadas as equações que representam seus funcionamentos em regime permanente. Por fim, é apresentado o problema FPO com a representação de cada equipamento.

No Capítulo 5 é analisada a influência dos equipamentos FACTS na região de segurança do sistema com o uso do FPO para mensurar tal região. Um modelo genérico de FPO com equipamentos FACTS é mostrado para derivar os fatores de sensibilidade para a alocação desses equipamentos no sistema.

O capítulo 6 mostra o desempenho do método primal-dual de pontos interiores em dois sistemas teste do IEEE e dois sistemas equivalentes da Região Sul do Brasil. Além disso, são feitos estudos para demonstrar o impacto dos equipamentos FACTS na operação de sistemas utilizando alguns índices de desempenho do Fluxo de Potência Ótimo. Ao final, conclusões sobre os ganhos obtidos com o uso dos equipamentos modelados são tiradas.

Por fim, o capítulo 7 é dedicado às considerações finais, onde serão apresentadas as análises finais do trabalho desenvolvido e as sugestões de continuidade da pesquisa.

## CAPÍTULO II

### 2. MODELAGEM DO STATCOM

#### 2.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentadas, inicialmente na Seção 2.2, a modelagem e as características do Conversor CC-CA (VSC), sendo esse dispositivo a base dos equipamentos FACTS de segunda geração. O modelo do VSC e as equações descritas nesta Seção servirão para a modelagem dos FACTS propostos nesta dissertação. Na Seção 2.3 é feita uma descrição detalhada do Compensador Estático Síncrono (STATCOM), juntamente com as equações de controle que definem seu funcionamento. A seguir, nas seções 2.4 e 2.5, são descritas a utilização do equipamento e as equações que representam sua operação. A maneira de introduzir o modelo do STATCOM no FPO é mostrada na Seção 2.6 e, por fim, na Seção 2.7, são feitas algumas conclusões.

#### 2.2 Modelagem do VSC

O VSC é um conversor que, a partir de uma fonte CC e de um inversor, produz, idealmente, tensões trifásicas senoidais. Para efeito dos equipamentos analisados nesta dissertação, o VSC pode ser considerado como um dispositivo que produz tensões trifásicas senoidais na frequência fundamental, com a amplitude e fase controláveis. Se uma fonte CC adequada for usada, o VSC pode ainda trocar potência ativa com o sistema CA. A fonte CC pode ser uma bateria ou um capacitor (Hingorani e Gyugyi, 2000; Watanabe et al., 2007).

O VSC pode fornecer ou absorver potência reativa através do controle da magnitude das tensões geradas. Se a tensão gerada pelo VSC for maior que a tensão do sistema CA ao qual está conectado, o VSC fornece potência reativa ao sistema. Se essa tensão for menor que a do sistema CA, o VSC absorve potência reativa do sistema (Almeida e Silveira, 2006).

As tensões geradas pelo VSC são baseadas na técnica PWM (Pulse Width Modulation) com o uso de chaves autocomutadas tipo IGBT ou IGCT, que podem operar em altas frequências. Com

essas chaves consegue-se gerar formas de ondas de tensão livres de harmônicas de baixa frequência, dispensando o transformador de eliminação de harmônicas e conseqüentemente reduzindo custos (Watanabe et al., 2007).

A Figura 2.1 mostra a representação do lado CC do conversor a ser conectado ao sistema CA, em série ou paralelo, através de um transformador de acoplamento à rede.

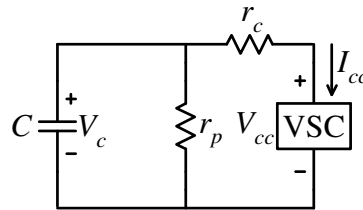


Figura 2.1 – Conversor CC-CA

Na Figura 2.1:

$r_c$  e  $r_p$  representam as perdas internas do equipamento devido a chaveamentos e perdas no capacitor  $C$ ;

$V_c$  é a magnitude da tensão no capacitor;

$V_{cc}$  é a magnitude da tensão do lado CC do conversor;

$I_{cc}$  é a corrente interna do conversor.

Sendo assim, com este modelo, a potência consumida pelo equipamento no seu lado CC é:

$$p_{cc} = V_{cc} I_{cc} = \frac{V_{cc}^2}{r_p + r_c} \quad (2.1)$$

Os equipamentos FACTS de segunda geração são representados usando o mesmo modelo para o VSC, apenas variando a maneira de instalação, série, em derivação ou uma combinação dessas, de acordo com os requeridos controles. Para que o balanço de potência seja nulo, a potência entregue pela rede,  $p_{ca}$ , deve ser igual à potência interna consumida pelo equipamento, ou seja:

$$p_{int} = p_{ca} - p_{cc} = 0 \quad (2.2)$$

A Equação de balanço de potência (2.2) servirá para a modelagem do STATCOM, SSSC e UPFC analisados neste trabalho. As expressões de  $p_{ca}$  serão detalhadas durante a modelagem de cada equipamento FACTS, sendo  $p_{cc}$  a mesma expressão para todos esses equipamentos.



## 2.3 Descrição do STATCOM

O compensador estático síncrono é o principal membro da família FACTS baseada em VSC. Tem sido estudado há alguns anos e é, atualmente, o equipamento FACTS de segunda geração mais utilizado para controle de tensão (Zhang, Zhang e Zhou, 2006; Almeida e Silveira, 2006).

O equipamento é composto por um transformador em derivação, um VSC e um controlador. De acordo com um sinal de referência específico enviado pelo controlador, para manter determinada tensão do sistema em um valor de referência, a tensão do conversor é alterada para injetar ou absorver potência reativa. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao do condensador síncrono, porém com resposta mais rápida devido a não possuir componentes móveis.

O STATCOM é conectado em paralelo com o sistema CA de acordo com a Figura 2.2.

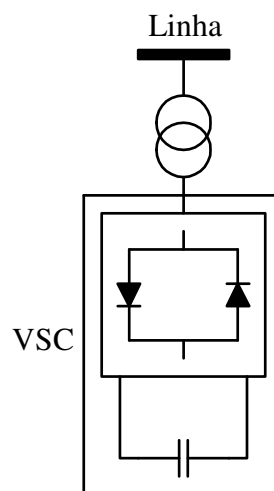


Figura 2.2: Compensador estático de reativos

O STATCOM apresenta algumas vantagens em relação ao seu antecessor de primeira geração, o SVC. Como já foi citado, gera poucos problemas com harmônicas de baixa frequência devido às características do conversor multipulso, não sendo necessária a utilização de sistemas de filtragem de harmônicas desta ordem, ao contrário do SVC (Watanabe et al., 2007).

O STATCOM tem uma alta velocidade de resposta quando comparado ao SVC, devido ao uso de GTO's, cuja extinção e condução podem ser controladas, ao contrário dos tiristores, onde somente a condução é controlada (Baliga, 1995).

Essas vantagens em relação aos equipamentos em derivação chaveados a tiristores são importantes em sistemas que venham a necessitar de um controle de tensão eficiente, rápido e flexível para diversas condições operacionais.

Outra vantagem do STATCOM em relação ao SVC é que a injeção ou absorção de potência reativa fornecida pelo STATCOM ao sistema CA independe da tensão da barra ao qual o equipamento está conectado. Portanto, a capacidade máxima de suporte de reativos decresce linearmente com a queda de tensão ao contrário do que ocorre com o SVC, onde tal decréscimo ocorre com o quadrado da queda de tensão. Essas características podem ser visualizadas pela Figura 2.3, que mostra que a injeção de corrente do equipamento pode ser mantida constante mesmo para tensões reduzidas.

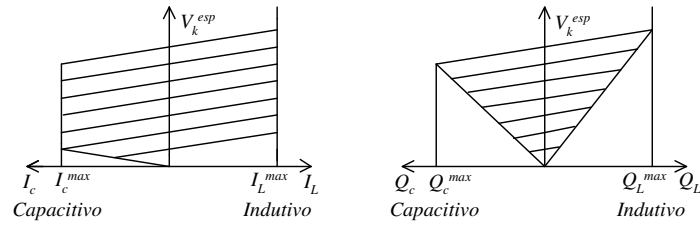


Figura 2.3 – Característica  $V \times I$  e  $V \times Q$  do STATCOM

Na Figura 2.3, pode-se verificar que a tensão  $V_k$  da barra CA onde o equipamento está inserido, é controlada linearmente, em torno de seu valor de referência  $V_k^{esp}$ , através da injeção de corrente ou potência reativa. Se a tensão  $V_k$  estiver com sua magnitude maior que o valor de referência  $V_k^{esp}$ , o equipamento opera na região indutiva absorvendo potência reativa, se a magnitude de  $V_k$  for menor que  $V_k^{esp}$ , o equipamento opera na região capacitiva, injetando potência reativa com a finalidade de manter a tensão da barra CA em um valor de referência pré-especificado.

O funcionamento do STATCOM pode ser expresso pelas equações de controle:

$$V_k = V_k^{esp} + x_{sl} I_s \quad (2.3)$$

e

$$V_k = V_k^{esp} + x'_{sl} Q_s \quad (2.4)$$

sendo  $x_{sl}$  e  $x'_{sl}$ , as inclinações das retas que representam a faixa de controle linear do equipamento, válida dentro de faixas específicas de corrente ou potência reativa:  $I_c^{max} \leq I_s \leq I_L^{max}$  ou  $Q_c^{max} \leq Q_s \leq Q_L^{max}$ .

A seguir são apresentadas as principais utilizações do STATCOM para melhorar o desempenho dos sistemas.

## 2.4 Utilização do STATCOM

A utilização do STATCOM em sistemas elétricos de potência é destacada na correção de problemas de controle de tensão e, conseqüentemente, no aumento da capacidade de carregamento do sistema.

A Figura 2.4 mostra um sistema utilizando o STATCOM no meio da linha de transmissão com a finalidade de aumentar a capacidade de transferência de potência entre geração e carga.

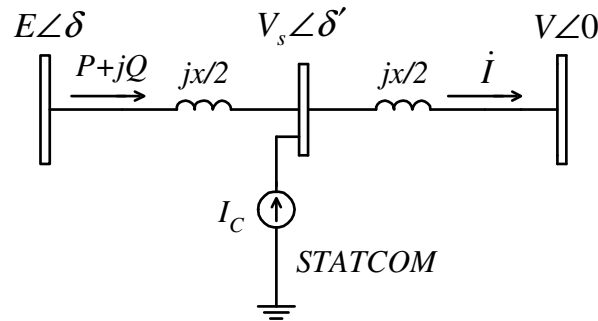


Figura 2.4 – Sistema com STATCOM

Até que atinja a máxima injeção de corrente capacitiva possível, o STATCOM, tal como o SVC, se comporta como um compensador shunt ideal colocado no meio da linha e mantendo a tensão na barra  $s$  igual a  $E$ . Neste caso a potência transmitida é

$$P = 2 \frac{VE}{x} \sin(\delta') \quad (2.5)$$

A partir do ponto em que a corrente injetada pelo equipamento atinge o limite, a corrente  $\dot{I}$  que chega ao barramento de carga é expressa por:

$$\dot{I} = \frac{E\angle\delta - V\angle 0^\circ}{jx} + \frac{I_c^{max}\angle\varphi}{2} \quad (2.6)$$

onde

$x$  representa a reatância total da linha de transmissão;

$I_c^{max}$  representa a máxima corrente capacitiva injetada pelo STATCOM.

A potência complexa que chega ao barramento de carga é calculada como:

$$\dot{S} = V \angle 0^\circ (\dot{I})^* \quad (2.7)$$

Substituindo a Equação (2.6) na Equação (2.7) tem-se:

$$\dot{S} = V \angle 0^\circ \left( \frac{E \angle \delta - V \angle 0^\circ}{jx} + \frac{I_c^{max} \angle \varphi}{2} \right)^* \quad (2.8)$$

$$\dot{S} = V \angle 0^\circ \left( \frac{E \angle -\delta - V \angle 0^\circ}{-jx} + \frac{I_c^{max} \angle -\varphi}{2} \right) \quad (2.9)$$

o que fornece

$$\dot{S} = \frac{VE(j \cos \delta + \text{sen} \delta) - jV^2}{x} + \frac{VI_c^{max}}{2} [\cos(-\varphi) + j \text{sen}(-\varphi)] \quad (2.10)$$

Extraindo a parte real de  $\dot{S}$  tem-se:

$$P = \frac{VE}{x} \text{sen} \delta + \frac{VI_c^{max}}{2} \cos(\varphi) \quad (2.11)$$

Como a corrente está sendo injetada na barra  $s$ , tem-se que  $-\dot{I}_c^{max}$  está adiantada de  $\dot{V}_s$  em  $90^\circ$ , ou seja,  $\varphi + \pi = \delta' + \frac{\pi}{2}$ , o que implica que  $\varphi = \delta' - \frac{\pi}{2}$ . Substituindo em (2.11) e lembrando que  $\cos\left(\delta' - \frac{\pi}{2}\right) = \text{sen}(\delta')$  tem-se:

$$P = \frac{VE}{x} \text{sen} \delta + \frac{VI_c^{max}}{2} \text{sen}(\delta') \quad (2.12)$$

A Equação (2.12) expressa a potência ativa entregue à carga com a inclusão do STATCOM injetando potência reativa ao sistema. Com o aumento de  $I_c^{max}$ , maiores valores de potência ativa são entregues à carga, conforme mostrado na Figura 2.5. Essa figura representa, para  $\delta' = \frac{\delta}{2}$ , a curva  $(P \times \delta)$  no caso sem compensação de linha, com o equipamento sem atingir o limite de corrente e para diversos valores de corrente máxima do STATCOM. Observa-se que, devido ao controle dos níveis de tensão, quanto maior a capacidade de injeção de corrente do STATCOM, maior a potência transmissível pela linha e no caso em que o equipamento não atinge o limite de corrente essa capacidade é ainda maior, conforme a curva plotada representando a Equação (2.5).

Comparando a Figura 2.5 com a Figura 1.10, onde é plotada a variação da potência transmitida em função do ângulo  $\delta$  na presença do SVC, nota-se diferença nas curvas formadas.

Enquanto no STATCOM as curvas se deslocam paralelamente à curva original sem compensação, no SVC essa propriedade não ocorre. A comparação destas figuras mostra que na região  $\pi/2 < \delta < \pi$  a potência transmitida,  $P$ , tem um decréscimo bem menos acentuado do que o observado para o SVC. Essa característica tem implicações importantes no impacto dos dois dispositivos na margem de estabilidade do sistema (Hingorani e Gyugyi, 2000).

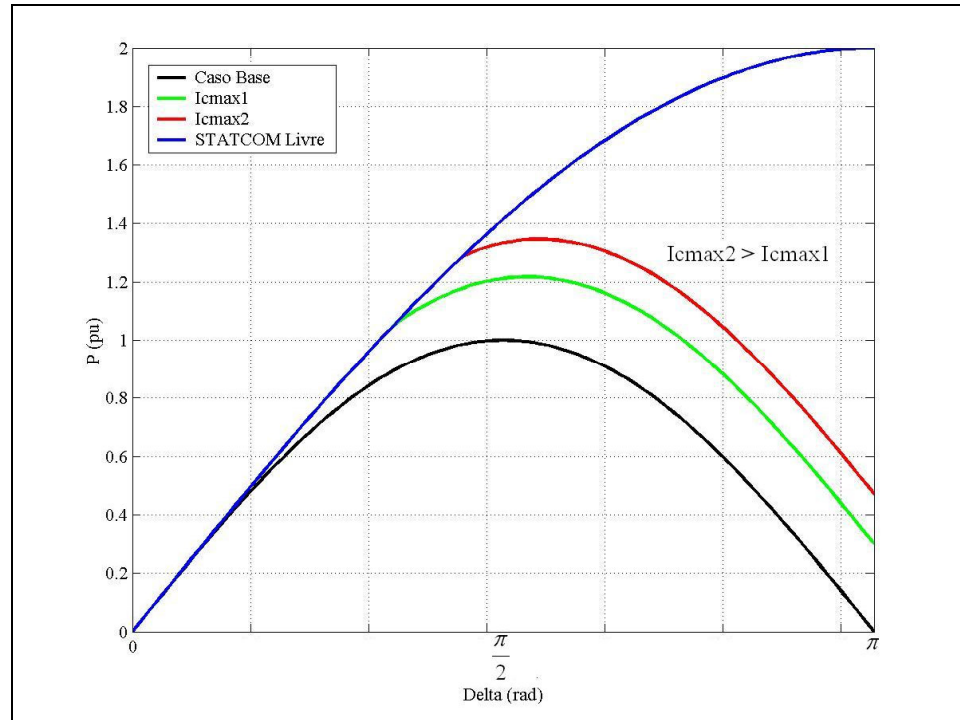


Figura 2.5 – Potência transmitida com o STATCOM

Em regime dinâmico, o STATCOM pode ser usado para melhorar o desempenho do sistema tanto para estabilidade angular quanto para a estabilidade de tensão. Ao manter a tensão na barra controlada durante uma contingência, ou pequenas perturbações no sistema, o STATCOM contribui para manter as potências fornecidas pelos geradores, reduzindo a potência acelerante (Almeida e Silveira, 2006).

As figuras 2.6 e 2.7 ilustram o efeito do STATCOM na estabilidade transitória de sistemas de potência para um sistema composto por um gerador conectado a uma barra infinita durante uma falta ocorrida. Nessas figuras as seguintes variáveis mostradas são definidas por:

$\delta_0$  ângulo de abertura inicial de rotor para a potência transmitida  $P$  no instante  $t = 0$ ;

$\delta_c$  ângulo de abertura de rotor no tempo de eliminação de falta  $t = t_c$  ;

$\delta_x$  ângulo de abertura de rotor depois de eliminada a falta em  $t = t_c$  ;

$\delta_{max}$  ângulo de abertura máximo do rotor para que não ocorra instabilidade.

A área entre  $\delta_0$  e  $\delta_c$  corresponde ao momento em que a potência elétrica é nula e a máquina síncrona tende a aumentar a velocidade em relação à velocidade síncrona. A área entre  $\delta_c$  e  $\delta_x$ , acima de P, corresponde ao momento em que a potência elétrica é maior que a potência mecânica e a máquina síncrona tende a diminuir a velocidade e voltar para o ponto de origem depois que toda energia cinética do rotor adquirida durante a falta for absorvida. Para que isso ocorra, as duas áreas têm que serem iguais (Kundur, 1994).

Nessas figuras, o tempo de eliminação da falta,  $t_c$ , entre os ângulos  $\delta_0$  e  $\delta_c$  são iguais e a potência transmitida P é a mesma para os dois casos. Sendo assim,  $\delta_0$  é diferente devido às curvas ( $P \times \delta$ ) não serem iguais. Considerando isso, o sistema sem STATCOM da Figura 2.6 atinge um ângulo de abertura de rotor  $\delta_x$  maior que o sistema da Figura 2.7 com STATCOM. Portanto, a margem para que o ângulo de abertura do rotor da máquina síncrona não atinja  $\delta_{max}$  é bem mais elevada para o caso com compensação. Com isso, o sistema compensado possui maior margem de estabilidade transitória e conseqüentemente um maior tempo disponível para eliminação da falta.

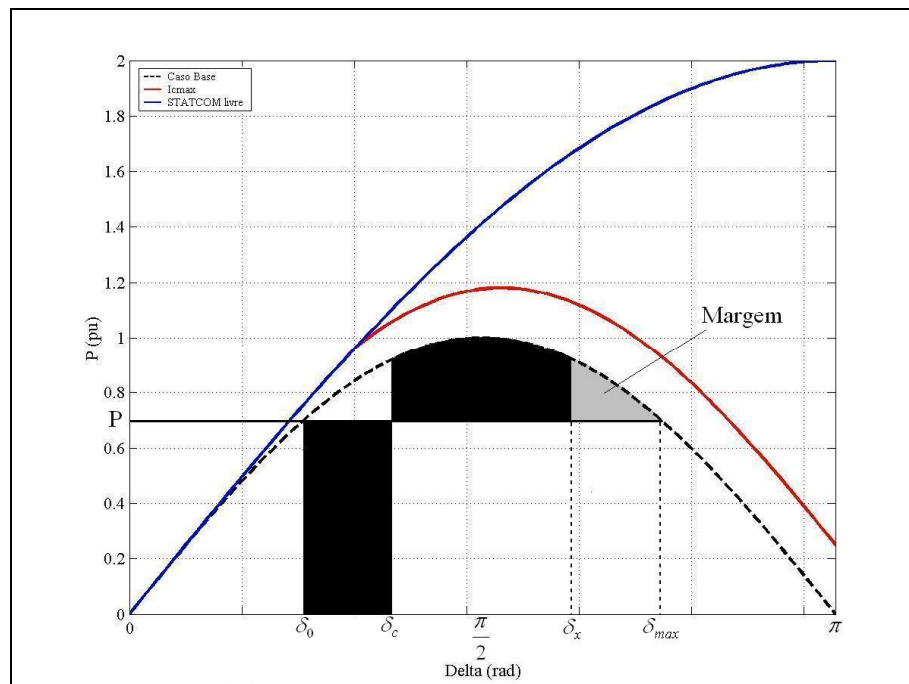


Figura 2.6 – Critério das áreas iguais para o sistema não compensado

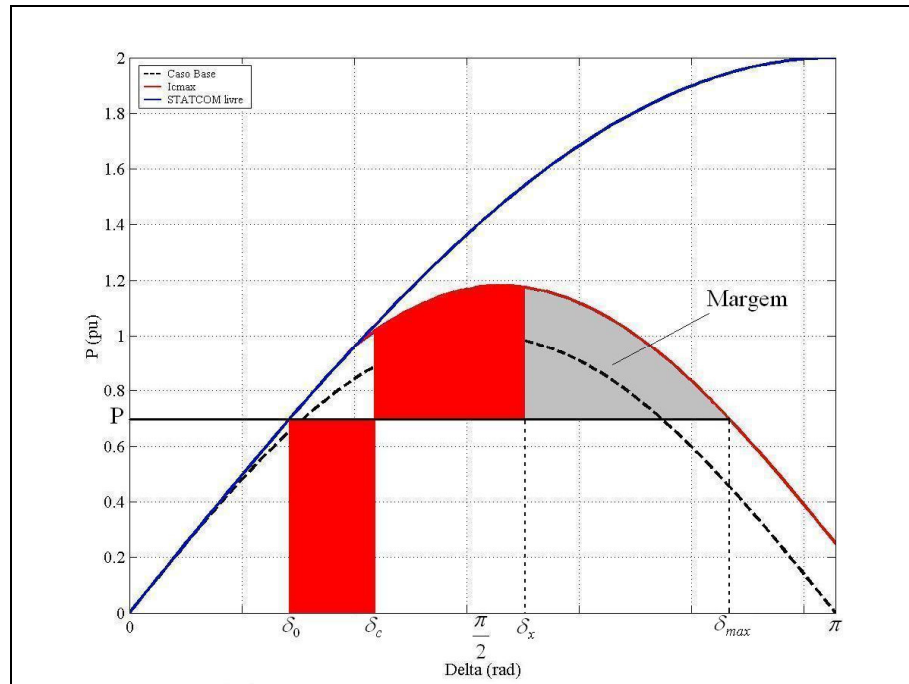


Figura 2.7 – Critério das áreas iguais para o sistema com STATCOM

Para analisar as vantagens do STATCOM na operação de sistemas de potência, são derivadas a seguir as equações em regime permanente que representam o funcionamento do equipamento.

## 2.5 Equações do STATCOM em Regime Permanente

A Figura 2.6 apresenta o STATCOM conectado em derivação ao sistema elétrico. O equipamento é representado através de injeções de potência constantes. Através desta representação, são derivadas as diversas expressões que representam seu funcionamento em regime permanente (Zhang, Zhang e Zhou, 2006).

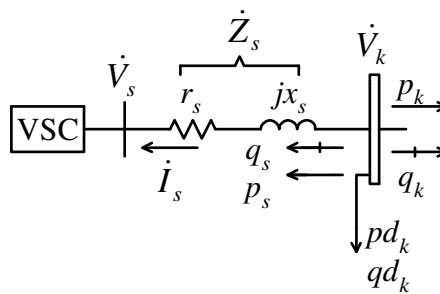


Figura 2.8 – STATCOM

Posteriormente, essas expressões e as equações de controle do equipamento serão inseridas no problema FPO.

As grandezas representadas na Figura 2.8 são definidas conforme descrito abaixo.

- $\dot{Z}_s$  : impedância do transformador de acoplamento do STATCOM à rede;
- $\dot{V}_k$  : tensão da barra  $k$  onde o equipamento é conectado;
- $\dot{V}_s$  : tensão nos terminais do STATCOM;
- $\dot{I}_s$  : corrente injetada no STATCOM;
- $pd_k$  : carga ativa da barra  $k$ ;
- $qd_k$  : carga reativa da barra  $k$ ;
- $p_k$  : somatório dos fluxos de potência ativa saindo da barra  $k$ ;
- $q_k$  : somatório dos fluxos de potência reativa saindo da barra  $k$ ;
- $p_s$  : perdas de potência ativa referentes ao transformador de acoplamento e conversor;
- $q_s$  : potência reativa fornecida ou absorvida pelo STATCOM.

A tensão CA nos terminais do VSC pode ser expressa por:

$$\dot{V}_s = k_s m_s V_{cc} \angle \psi \quad (2.13)$$

sendo

- $k_s$  : ganho do conversor mais a taxa de elevação de tensão do transformador;
- $m_s$  : faixa de modulação do PWM;
- $V_{cc}$  : magnitude da tensão do lado CC do conversor;
- $\psi$  : ângulo da tensão do VSC.

Analisando a Figura 2.8, a corrente injetada ou absorvida pelo equipamento é:

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{V}_k - \dot{V}_s}{\dot{Z}_s} \quad (2.14)$$

onde  $\dot{V}_k = V_k \angle \delta_k$  e  $\dot{Z}_s = Z_s \angle \beta$ .



A potência ativa e reativa injetada pelo STATCOM, derivadas da expressão da potência complexa,  $\dot{S}_s = \dot{V}_k \dot{I}_s^*$ , são, respectivamente:

$$p_s = \text{Re}\{\dot{S}_s\} = \frac{V_k^2 \cos\beta - V_k k_s m_s V_{cc} \cos(\delta_k - \psi + \beta)}{Z_s} \quad (2.15)$$

$$q_s = \text{Im}\{\dot{S}_s\} = \frac{V_k^2 \sin\beta - V_k k_s m_s V_{cc} \sin(\delta_k - \psi + \beta)}{Z_s} \quad (2.16)$$

As injeções de potência,  $p_s$  e  $q_s$ , deverão ser consideradas nas equações de balanço de potência ativa e reativa da barra  $k$  do sistema, na qual o STATCOM é inserido. Sendo assim, essas equações se tornam:

$$pg_k - pd_k - p_k(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) - p_s(V_k, \delta_k, m_s, \psi) = 0 \quad (2.17)$$

$$qg_k - qd_k - q_k(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) - q_s(V_k, \delta_k, m_s, \psi) + b_k V_k^2 = 0 \quad (2.18)$$

A potência ativa injetada no VSC pela rede para suprir as perdas do equipamento é expressa por:

$$p_{ca} = \text{Re}\{\dot{V}_s \dot{I}_s^*\} = \frac{V_k k_s m_s V_{cc} \cos(\psi - \delta_k + \beta) - (k_s m_s V_{cc})^2 \cos\beta}{Z_s} \quad (2.19)$$

O valor de  $p_{ca}$  deverá ser igual a potência interna consumida pelo conversor, expressa pela Equação (2.2).

Para introduzir o STATCOM no problema FPO, quatro equações descritas anteriormente têm que serem representadas no problema. A Equação (2.2), que representa o balanço de potência interna do conversor, a Equação (2.4), que representa a característica tensão versus potência reativa do equipamento e as equações (2.17) – (2.18), que representam o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente, da barra com STATCOM. Além dessas equações, devem ser considerados os limites nas variáveis de controle do equipamento (ângulo da tensão do conversor,  $\psi$ , e faixa de modulação do PWM,  $m_s$ ), corrente injetada no equipamento e tensão especificada do equipamento,  $V_K^{esp}$ .

## 2.6 Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo

A representação do STATCOM no problema FPO modifica as equações de balanço de potência, originalmente expressas por (1.22) e (1.23), de acordo com as expressões a seguir:

$$\mathbf{pg} - \mathbf{pd} - \mathbf{p}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) - \mathbf{p}_s(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) = \mathbf{0} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{qg} - \mathbf{qd} - \mathbf{q}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) - \mathbf{q}_s(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) + \text{diag}(\mathbf{V}_i^2) \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (2.21)$$

Além disso, a inclusão do STATCOM adiciona as seguintes restrições de igualdade e desigualdade, referentes às equações de controle e limites operativos do equipamento.

$$\mathbf{p}_{ca}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{p}_{cc} = \mathbf{0} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^{esp} + \mathbf{x}'_{sl} \mathbf{q}_s \quad (2.23)$$

$$\mathbf{V}^{min} \leq \mathbf{V}^{esp} \leq \mathbf{V}^{max} \quad (2.24)$$

$$|\mathbf{I}_s| \leq \mathbf{I}_s^{max} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{m}_s^{min} \leq \mathbf{m}_s \leq \mathbf{m}_s^{max} \quad (2.26)$$

$$\psi^{min} \leq \psi \leq \psi^{max} \quad (2.27)$$

A variável  $p_{cc}$  representa as perdas internas do conversor VSC e é descrita por (2.1), o índice  $k$  representa as posições nos vetores referentes às barras onde o STATCOM foi alocado e  $nstat$  representa o número de STATCOM's inseridos no sistema. Com esse modelo genérico, podem-se introduzir diversos equipamentos no sistema definindo a posição destes nos vetores detalhados a seguir, sendo

$\mathbf{p}_s$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $p_s(V_k, \delta_k, m_s, \psi)$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{q}_s$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $q_s(V_k, \delta_k, m_s, \psi)$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{P}_{ca}$ : vetor de dimensão  $(nstat \times I)$  com  $p_{ca}(V_k, \delta_k, m_s, \psi)$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{p}_{cc}$ : vetor de dimensão  $(nstat \times I)$  com  $p_{cc}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{V}^{esp}$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $V_k^{esp}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{x}'_{sl}$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $x'_{sl}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{I}_s$ : vetor de dimensão  $(nstat \times I)$  com  $I_s$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{I}_s^{max}$ : vetor de dimensão  $(nstat \times I)$  com  $I_s^{max}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{m}_s$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $m_s$  na posição  $k$ ;

$\psi$  : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $\psi$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{m}_s^{min}, \mathbf{m}_s^{max}$  : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com restrições de limites de  $m_s$  na posição  $k$ ;

$\psi^{min}, \psi^{max}$  : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com restrição de limites de  $\psi$  na posição  $k$ .

Observa-se que as novas restrições do FPO possuem as mesmas características das restrições originais, ou seja, são contínuas, diferenciáveis e algumas não lineares.

Resumindo, o problema FPO com a inclusão do STATCOM é formado por todas as equações referentes ao problema sem FACTS, descritas na Seção 1.5.4, apenas alterando as equações de balanço de potência descritas em (2.20) e (2.21) para a barra com o equipamento, e a inclusão das equações (2.22) – (2.27), que representam as equações de controle e os limites do equipamento.

Quando o STATCOM é representado no problema de fluxo de carga, supõe-se  $V_k^{esp}$  constante. No caso da representação desse equipamento no FPO, em vez de fixar a tensão da barra  $k$  em um valor especificado, trabalha-se com uma faixa de valores de tensões obrigatórios, que são obtidos durante o processo de otimização, para se alcançar um melhor índice de desempenho da função objetivo através da Equação (2.23). Esta propriedade pôde ser analisada durante as simulações feitas comparando-se com valores fixos de  $V_K^{esp}$ . Nota-se que  $V_k^{esp}$  é um ajuste do equipamento durante a operação, e o FPO sugere um ajuste ótimo dessa variável.

## 2.7 Conclusões

Neste capítulo, foi feito um estudo do impacto do STATCOM na rede elétrica através de um exemplo composto de duas barras. Com este estudo, mostrou-se que o equipamento aumenta a capacidade de transferência de potência dos circuitos com vantagens em relação ao seu antecessor de primeira geração, o SVC.

Com o objetivo de analisar o impacto do STATCOM na operação em regime permanente, derivou-se um modelo genérico para o STATCOM baseado em injeções de potência. Esse modelo foi introduzido no FPO. Pôde-se observar que não há uma grande alteração nas características do problema FPO quando o STATCOM é representado.

O impacto do equipamento em sistemas de maior porte será analisado na seção de resultados.

## CAPÍTULO III

### 3. MODELAGEM DO SSSC

#### 3.1 Introdução

O Compensador Série Síncrono Estático (SSSC) é também um membro da família de equipamentos FACTS de segunda geração. O SSSC modelado neste capítulo é baseado na mesma fonte conversora de tensão descrita na Seção 2.2, o que muda é a forma como o equipamento é inserido na rede, conforme será descrito na Seção 3.2. A Seção 3.3 apresenta a utilização do equipamento, seu impacto na transferência de potência e seus modos de controle, a fim de aumentar o desempenho dos sistemas elétricos de potência. As equações que representam a operação do SSSC em regime permanente e a maneira de inserir estas equações no FPO são apresentadas nas seções 3.4 e 3.5, respectivamente. Por fim, algumas conclusões são feitas na Seção 3.6.

#### 3.2 Descrição do Equipamento

O SSSC é como um STATCOM, exceto que a tensão de saída AC está em série com a linha de transmissão (Machado, 2003). Foi concebido para realizar o controle de fluxo de linhas. Sua operação é similar a do TCSC e TSSC, porém possui maior capacidade de controle, sendo capaz de manter uma tensão série de compensação constante, mesmo com a variação da corrente da linha (Hingorani e Gyugyi, 2000). O equipamento modelado aqui é baseado na técnica de controle PWM, também utilizada para o modelo do STATCOM, por possuir vantagens com relação a custos devido a não utilização do transformador de eliminação de harmônicos (Watanabe et al., 2007).

Assim como o STATCOM, o SSSC também é composto por um VSC e um controlador. O lado de alta tensão do transformador conecta o VSC em série com a linha, tal como indicado na representação esquemática mostrada na Figura 3.1, onde o SSSC é inserido na linha de transmissão que interliga as barras  $k$  e  $m$  de um sistema.

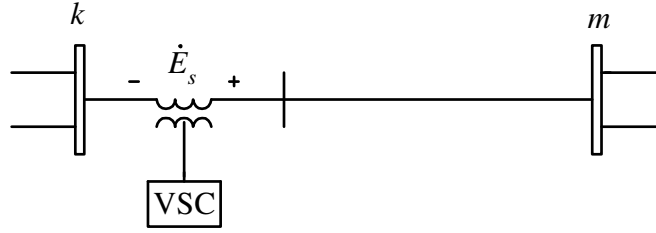


Figura 3.1 – Representação esquemática do SSSC

Na Figura 3.1, a tensão  $\dot{E}_s$ , em série com a linha de transmissão, é expressa pela equação a seguir:

$$\dot{E}_s = k_{ss} m_{ss} V_{ccs} \angle \psi_s \quad (3.1)$$

sendo

$k_{ss}$  o ganho do conversor mais a taxa de elevação de tensão do transformador;

$m_{ss}$  a faixa de modulação do PWM;

$V_{ccs}$  a magnitude da tensão do lado CC do conversor;

$\psi_s$  o ângulo da tensão do VSC.

De acordo com a variável a ser controlada em um valor específico, o controlador varia a magnitude e a fase da tensão  $\dot{E}_s$  através dos parâmetros  $m_{ss}$  e  $\psi_s$ . Com este controle, há a possibilidade de um controle de potência ativa, reativa, de tensão e de impedância série da linha (Zhang, 2003).

O princípio de operação do SSSC pode ser explicado por uma comparação com a compensação fixa através de um capacitor série. A corrente da linha através do capacitor produz uma queda de tensão que contrabalança a queda de tensão na reatância original da linha. Esta tensão pode ser substituída por uma fonte de tensão série, na forma de um VSC, que faz o mesmo papel do capacitor. A grande vantagem de utilizar uma fonte de tensão série controlada, no lugar da compensação fixa, é o fato dos parâmetros do VSC se ajustarem adequadamente de maneira a manter a tensão série em um valor especificado, independente das variações na corrente da linha de transmissão. Porém, o custo do transformador de acoplamento do SSSC à rede CA ainda é muito alto, devido a este equipamento ser dimensionado para suportar a corrente que circula pela linha de transmissão.

A seguir são apresentadas as principais utilizações do SSSC para melhorar o desempenho dos sistemas.

### 3.3 Utilização do SSSC

A Figura 3.2 representa uma linha de transmissão onde é inserido o SSSC. A queda de tensão  $\dot{E}_s$  no transformador de acoplamento do equipamento com a rede é representada por uma fonte de tensão em série com a linha de transmissão. A tensão  $\dot{E}_s$ , controlada pelo SSSC, pode ser ajustada de maneira a estar adiantada ou atrasada de  $90^\circ$  em relação à corrente  $\dot{I}$  que circula pela linha. Portanto, o ângulo de  $\dot{E}_s$ ,  $\psi_s$ , pode ser expresso por:

$$\psi_s = \varphi \pm 90^\circ \quad (3.2)$$

sendo

$\varphi$  o ângulo da corrente  $\dot{I}$  que circula pela linha de transmissão e SSSC.

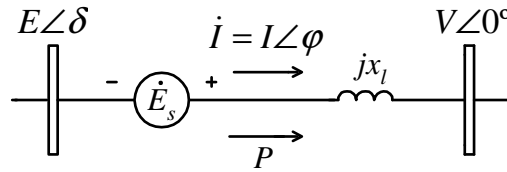


Figura 3.2 – Sistema de transmissão com SSSC

Substituindo a Equação (3.2) na Equação (3.1) tem-se:

$$\dot{E}_s = k_{ss} m_{ss} V_{ccs} \angle(\varphi \pm 90^\circ) \quad (3.3)$$

ou

$$\dot{E}_s = \pm j E_s \angle \varphi \quad (3.4)$$

A corrente  $\dot{I}$  e a potência complexa  $\dot{S}$  que circulam pela linha de transmissão são expressas respectivamente por:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} + \dot{E}_s - \dot{V}}{jx} \quad (3.5)$$

$$\dot{S} = \dot{E}(\dot{I})^* \quad (3.6)$$

Substituindo a Equação (3.5) na Equação (3.6) tem-se:

$$\dot{S} = \dot{E} \left( \frac{\dot{E} + \dot{E}_s - \dot{V}}{jx} \right)^* \quad (3.7)$$

$$\dot{S} = \dot{E} \left( \frac{\dot{E}^* + \dot{E}_s^* - \dot{V}^*}{x} \right) j \quad (3.8)$$

$$\dot{S} = \frac{j}{x} (E^2 + E \dot{E}_s^* - E \dot{V}^*) \quad (3.9)$$

Trabalhando com  $\dot{E}_s$  defasado de  $-90^\circ$  em relação à corrente  $\dot{I}$ ,  $\dot{E}_s = -jE_s \angle \varphi$ , para ser substituído na Equação (3.9). Esta defasagem corresponde ao efeito de compensar a linha com um capacitor série. A queda de tensão no capacitor compensa a queda de tensão na reatância da linha.

$$\dot{S} = \frac{j}{x} [E^2 - jEE_s \angle (\delta - \varphi) - EV \angle \delta] \quad (3.10)$$

Expandindo a expressão (3.10) tem-se:

$$\dot{S} = \frac{j}{x} \{E^2 - j[EE_s \cos(\delta - \varphi) + jEE_s \sin(\delta - \varphi)] - EV \cos(\delta) - jEV \sin(\delta)\} \quad (3.11)$$

$$\dot{S} = \frac{j}{x} \{jE^2 + EE_s \cos(\delta - \varphi) + jEE_s \sin(\delta - \varphi) - jEV \cos(\delta) + EV \sin(\delta)\} \quad (3.12)$$

Extraindo a parte real e imaginária da Equação (3.12), encontram-se as expressões da potência ativa e reativa que circulam pela linha de transmissão da Figura 3.2, na presença do SSSC operando semelhante de forma semelhante a um capacitor conforme as seguintes equações:

$$P = \frac{EV \sin(\delta)}{x} + \frac{EE_s \cos(\delta - \varphi)}{x} \quad (3.13)$$

e

$$Q = \frac{E^2 - EV \cos(\delta)}{x} + \frac{EE_s \sin(\delta - \varphi)}{x} \quad (3.14)$$

Se as tensões das barras da Figura 3.2 possuírem a mesma magnitude, o ângulo da corrente  $\dot{I}$  corresponde a  $\frac{\delta}{2}$  para o caso sem SSSC. Supondo que com a introdução do SSSC e os ajustes dos parâmetros  $m_{ss}$  e  $\Psi_s$  o ângulo  $\varphi$  da corrente permaneça em  $\frac{\delta}{2}$ , a expressão da potência ativa e reativa fica em função do módulo de  $\dot{E}_s$ . Para generalizar as equações (3.13) e (3.14),  $\dot{E}_s$  tem sinal

positivo ou negativo, dependendo se está atrasada ou adiantada de  $90^\circ$  em relação à  $\dot{I}$ . Portanto, para  $E=V$ , tem-se

$$P = \frac{E^2 \sin(\delta)}{x} + \frac{E(\pm E_s) \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{x} \quad (3.15)$$

$$Q = \frac{E^2 - E^2 \cos(\delta)}{x} + \frac{E(\pm E_s) \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{x} \quad (3.16)$$

A potência ativa na linha em função de  $\delta$  é mostrada na Figura 3.3 para  $E_s = 0$  e para diferentes valores de tensão de compensação. Para  $E_s = 0$ , tem-se o sistema sem compensação. Com o aumento no módulo de  $\dot{E}_s$ , verifica-se um aumento na capacidade de transferência de potência ativa do sistema. Se  $E_s$  operar com valores negativos, o fluxo de potência na linha tende a diminuir, da mesma maneira que ocorreria se um reator série fosse introduzido na linha para limitar o fluxo. Dependendo da magnitude de  $\dot{E}_s$  negativo, é possível reverter o sentido do fluxo de acordo com o mostrado na Figura 3.3.

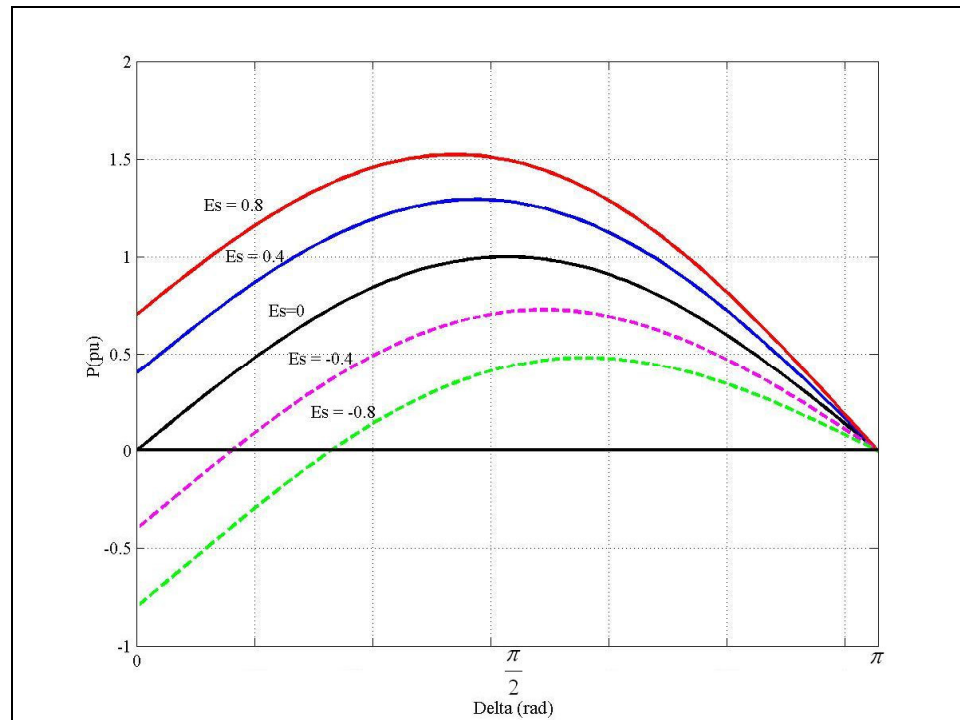


Figura 3.3 – Transferência de potência ativa com SSSC em função de  $E_s$



A potência reativa na linha em função de  $\delta$  é mostrada na Figura 3.4 para diversos valores de magnitude de  $\dot{E}_s$ .

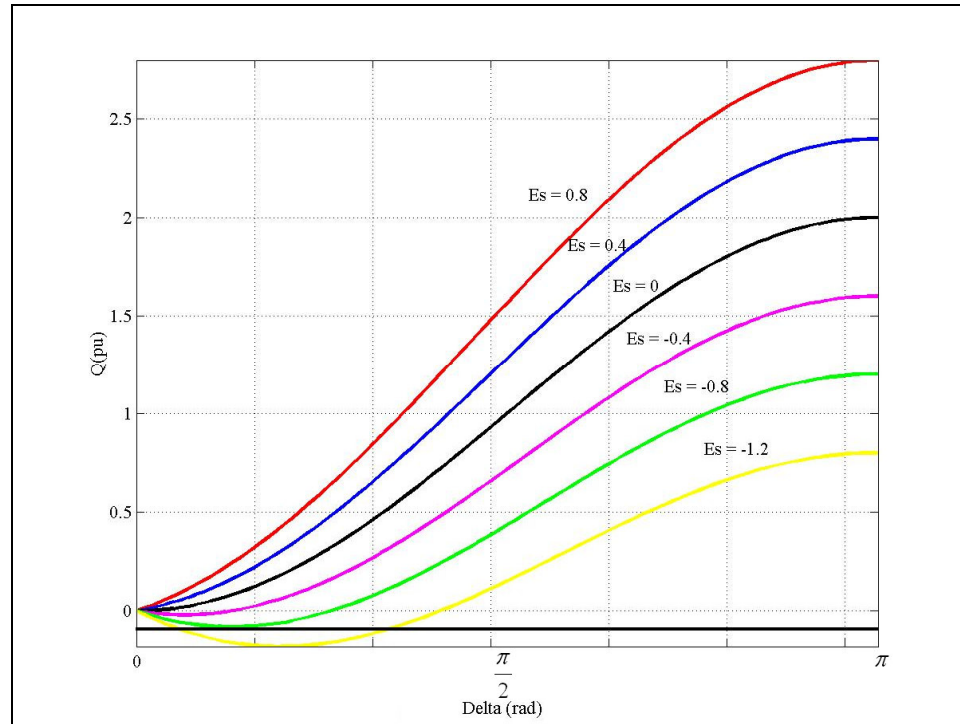


Figura 3.4 – Transferência de potência reativa com SSSC em função de  $E_s$

A Figura 3.4 mostra as variações na potência reativa transmitida em função da variação da magnitude de  $\dot{E}_s$ . De forma semelhante ao que ocorre com a potência ativa, observa-se que o aumento no módulo de  $\dot{E}_s$  também aumenta a transferência de potência reativa. Mais uma vez nota-se que com valores negativos de  $\dot{E}_s$  é possível diminuir o fluxo de potência reativa na linha e até reverter o sentido desse fluxo.

Resumindo, através da magnitude e ângulo de  $\dot{E}_s$  consegue-se o controle desejado do fluxo de potência ativa e reativa na linha de transmissão. Caso o ângulo de  $\dot{E}_s$  não estiver em quadratura com a corrente  $\dot{I}$ , o SSSC pode trocar potência ativa com a rede para compensar as perdas de transmissão.

No modelo proposto nesta dissertação, a defasagem entre  $\dot{E}_s$  e  $\dot{I}$  não chega a estar em quadratura, mas é aproximadamente  $90^\circ$ , devido as perdas do VSC,  $p_{cc}$ , descritas pela Equação (2.1). Neste caso, a potência é suprida pela rede CA em que o SSSC está inserido, mas poderia ser suprida por uma bateria externa.

A capacidade de inverter o fluxo de potência na linha de transmissão é uma das vantagens que o SSSC tem em relação ao TCSC, conforme o que pode se analisar nas figuras 1.13 e 3.3. Nota-se nessas figuras que a máxima potência transmitida pelo TCSC depende do ângulo  $\delta$ , enquanto que para o SSSC a máxima transferência de potência depende do módulo de  $\dot{E}_s$ , independente do ângulo  $\delta$ .

Outra vantagem do SSSC em relação à outros métodos de controle de fluxo de potência, tais como o TCSC e o TSSC, é a capacidade que este equipamento tem de manter a tensão de compensação  $\dot{E}_s$  independente da corrente que circula pela linha. A característica  $V \times I$  do SSSC, mostrada na Figura 3.5, indica que o equipamento pode operar livremente dentro da região definida pelos limites de tensão e de corrente (Hingorani e Gyugyi, 2000). Supondo os limites de tensão respeitados, o limite de corrente define a faixa de operação, sendo  $E_{sL}^{max}$  e  $E_{sC}^{max}$  a magnitude da tensão série  $\dot{E}_s$ , adiantada ou atrasada de  $90^\circ$  em relação à  $\dot{I}$ , respectivamente.

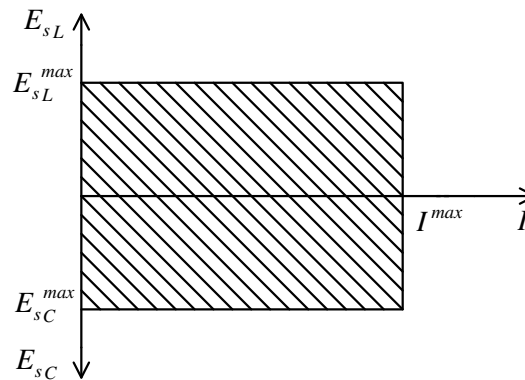


Figura 3.5 – Relação  $V \times I$  do SSSC

Através de um adequado controle de  $\dot{E}_s$  ou ainda, através dos parâmetros  $m_{ss}$  e  $\Psi_s$  do VSC, o SSSC pode operar de maneira a controlar o fluxo de potência ativa ou reativa da linha de transmissão em valores especificados de acordo com as equações de controle (3.17) e (3.18):

$$p_{km} - p_{km}^{esp} = 0 \quad (3.17)$$

$$q_{km} - q_{km}^{esp} = 0 \quad (3.18)$$

Essas características do SSSC podem ser demonstradas pelo exemplo feito com o sistema de duas barras da Figura 3.2 e pelos gráficos mostrados nas figuras 3.3 e 3.4, que sugerem uma faixa de operação controlável para essas grandezas.

A característica do equipamento mostrada nas figuras 3.3 e 3.4 demonstram que é possível aumentar ou diminuir o fluxo de potência ativa ou reativa na linha, sendo que esses controles são umas das funcionalidades que podem ser exploradas para corrigir problemas de fluxos paralelos e de malha, redistribuindo os fluxos de acordo com o desempenho desejável. O equipamento também pode ser utilizado para controlar a tensão da barra de origem dos fluxos onde está inserido, neste exemplo a barra  $k$ , ou a impedância equivalente da linha em valores específicos conforme as equações de controle (3.19) e (3.20).

$$V_k - V_k^{esp} = 0 \quad (3.19)$$

$$X_{km} - X_{km}^{esp} = 0 \quad (3.20)$$

O modo de controle (3.20) apresenta certas dificuldades, pois para obter uma reatância equivalente há a necessidade de se obter uma relação entre a corrente que circula pelo SSSC e a tensão  $\dot{E}_s$ . Se uma dessas variáveis atingirem seus respectivos limites, o controle sobre  $X_{km}$  fica prejudicado (Zhang, 2003).

O SSSC, assim como o STATCOM, também serve para melhorar o desempenho do sistema tanto para estabilidade angular quanto para estabilidade de tensão devido à capacidade de manter a tensão na barra controlada durante uma contingência, ou pequenas perturbações no sistema, contribuindo para manter as potências fornecidas pelos geradores e reduzindo a potência acelerante (Almeida e Silveira, 2006).

O aumento da margem de estabilidade transitória é possível pela rápida passagem do SSSC para a região capacitiva, compensando a reatância e aumentando a potência elétrica através da linha onde o equipamento está inserido. Com isso, a potência acelerante é reduzida. Porém, esta atuação depende de uma ação de controle adequada (Gama e Silveira, 1994).

Problemas referentes à estabilidade de tensão podem ser resolvidos pela utilização do SSSC para manter a tensão nas barras pelo modo de controle definido pela Equação (3.19) e com isso contribuir para o aumento no carregamento do sistema (Natesan e Radman, 2004).

De forma semelhante ao que ocorre com o sistema compensado com STATCOM, a alocação do SSSC também permite o aumento da margem de estabilidade transitória conforme o que se pode analisar nas figuras 3.6 e 3.7. Nessas figuras, nota-se que se consegue operar com um ângulo de abertura inicial de rotor menor que o sistema não compensado, para uma mesma potência, devido à curva ( $P \times \delta$ ) se deslocar verticalmente com o sistema compensado com SSSC.

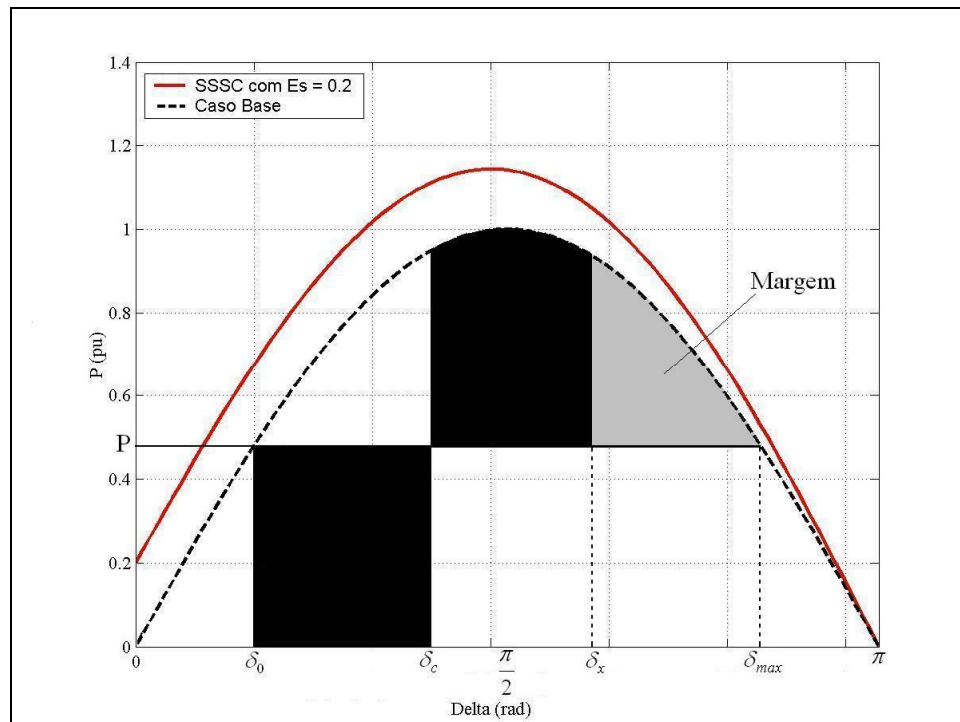


Figura 3.6 – Critério das áreas iguais para o sistema não compensado

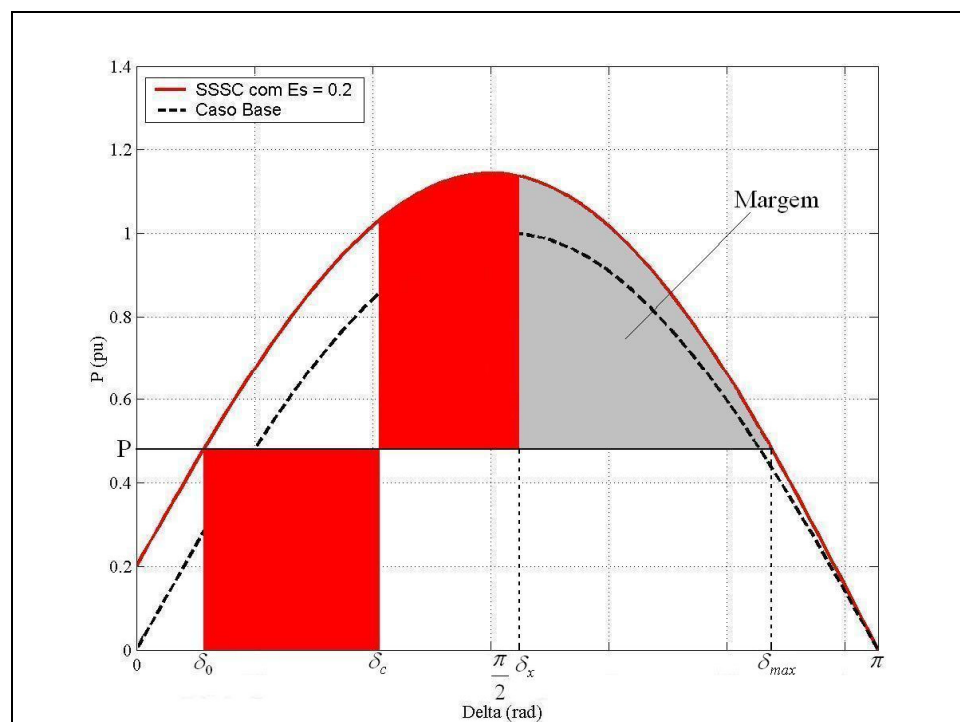


Figura 3.7 – Critério das áreas iguais para o sistema com SSSC

Para analisar as vantagens do SSSC, na operação de sistemas de potência, são derivadas a seguir as equações em regime permanente que representam o funcionamento do equipamento.

### 3.4 Equações do SSSC em Regime Permanente

A Figura 3.8 mostra o circuito equivalente da conexão do SSSC à rede CA. Com o auxílio deste circuito, são desenvolvidas as equações em regime permanente usadas na implementação do SSSC no FPO. As expressões a seguir foram obtidas com base nos trabalhos de Radman e Raje (2006) e Zhang (2003), que representam o SSSC com as equações do problema de fluxo de carga.

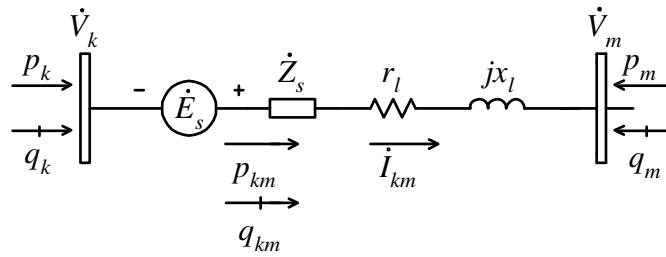


Figura 3.8 – Circuito equivalente do SSSC

Na Figura 3.8 tem-se,

- $\dot{Z}_s$  : impedância do transformador de acoplamento do SSSC à rede;
- $r_l$  e  $x_l$  : parâmetros da linha de transmissão;
- $\dot{V}_k$  e  $\dot{V}_m$  : tensões das barras terminais,  $k$  e  $m$ , da linha onde o equipamento está inserido;
- $\dot{E}_s$  : tensão em série com a linha de transmissão gerada pelo SSSC;
- $\dot{I}_{km}$  : corrente circulando pelo SSSC e linha de transmissão;
- $p_k$  e  $p_m$  : injeção de potência ativa na barra  $k$  e  $m$ , respectivamente;
- $q_k$  e  $q_m$  : injeção de potência reativa na barra  $k$  e  $m$ , respectivamente;
- $p_{km}$  : fluxo de potência ativa na linha de transmissão e no SSSC;
- $q_{km}$  : fluxo de potência reativa na linha de transmissão e no SSSC.

A tensão  $\dot{E}_s$ , gerada pelo SSSC, em série com a linha, foi definida pela Equação (3.1).

A admitância total do circuito da Figura 3.8, ou seja, o resultado equivalente das admitâncias do SSSC,  $\dot{y}_{SSSC}$ , e da linha,  $\dot{y}_l$ , onde o SSSC está instalado, é definido por:

$$\dot{y}_{km} = y_{km} \angle \theta_{km} = g_{km} + j b_{km} \quad (3.21)$$

sendo  $g_{km}$  e  $b_{km}$ , a condutância e a susceptância total do conjunto, respectivamente.

Com isso, a corrente que circula pelo SSSC é expressa como:

$$\dot{I}_{km} = \dot{y}_{km} (\dot{V}_k + \dot{E}_s - \dot{V}_m) \quad (3.22)$$

e

$$\dot{I}_{mk} = \dot{y}_{km} (\dot{V}_m - \dot{E}_s - \dot{V}_k) \quad (3.23)$$

A potência complexa que circula pela linha de transmissão no sentido da barra  $k$  para a barra  $m$  é definida por  $\dot{S}_{km} = \dot{V}_k \dot{I}_{km}^*$ , e as expressões de potência ativa e reativa na linha são, respectivamente:

$$p_{km} = \text{Re}\{\dot{S}_{km}\} = V_k^2 g_{km} + V_k k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \cos(\delta_k - \psi_s - \theta_{km}) - V_k V_m y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \quad (3.24)$$

$$q_{km} = \text{Im}\{\dot{S}_{km}\} = -V_k^2 b_{km} + V_k k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \sin(\delta_k - \psi_s - \theta_{km}) - V_k V_m y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) \quad (3.25)$$

Para o sentido da barra  $m$  para a barra  $k$ ,  $\dot{S}_{mk} = \dot{V}_m \dot{I}_{mk}^*$ , e as expressões de potência ativa e reativa na linha são, respectivamente:

$$p_{mk} = \text{Re}\{\dot{S}_{mk}\} = V_m^2 g_{km} - V_m k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \cos(\delta_m - \psi_s - \theta_{km}) - V_k V_m y_{km} \sin(\delta_m - \delta_k - \theta_{km}) \quad (3.26)$$

$$q_{mk} = \text{Im}\{\dot{S}_{mk}\} = -V_m^2 b_{km} - V_m k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \sin(\delta_m - \psi_s - \theta_{km}) - V_m V_k y_{km} \cos(\delta_m - \delta_k - \theta_{km}) \quad (3.27)$$

Sendo assim, as injeções de potência ativa e reativa na barra  $k$  são expressas, respectivamente, por:

$$p_k = p_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) + p'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (3.28)$$

$$q_k = q_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) + q'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (3.29)$$

e para a barra  $m$

$$p_m = p_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) + p'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (3.30)$$

$$q_m = q_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) + q'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (3.31)$$

Nas equações anteriores,  $p'_k$ ,  $q'_k$ ,  $p'_m$  e  $q'_m$  representam as injeções de potência nas barras  $k$  e  $m$  sem os fluxos ativo e reativo na linha  $km$ , que são expressos pelas equações (3.24) a (3.27), respectivamente.

A representação das equações em regime permanente do SSSC necessita de algumas alterações na matriz admitância de barras original do sistema,  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$ , pois a linha de transmissão onde é inserido o equipamento é retirada do sistema original para que suas contribuições no balanço de potência ativa e reativa sejam explicitadas.

Para derivar  $p'_k$ ,  $q'_k$ ,  $p'_m$  e  $q'_m$  deve-se modificar a matriz  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$ . Originalmente os elementos  $(i,i)$ ,  $(i,n)$ ,  $(n,i)$  e  $(n,n)$ , para  $i, n = 1, \dots, nb$ , são definidos da seguinte maneira.

$\dot{Y}_{ii}$  e  $\dot{Y}_{nn}$ : é a indutância própria da barra, calculada pela soma das admitâncias adjacentes à respectiva barra;

$\dot{Y}_{in}$  e  $\dot{Y}_{ni}$ : é o negativo da admitância entre as barras, conhecida como admitância de transferência.

Com a introdução do SSSC, são necessárias modificações nas posições  $(k,k)$ ,  $(k,m)$ ,  $(m,k)$  e  $(m,m)$  da matriz  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$  original. É preciso subtrair a admitância série,  $\dot{y}_l$ , da linha de transmissão  $km$ , onde o SSSC é inserido, dos elementos  $\dot{Y}_{kk}$  e  $\dot{Y}_{mm}$  e anular as admitâncias de transferência das posições  $km$  e  $mk$  gerando uma matriz auxiliar  $\dot{\mathbf{Y}}'_{barra}$  de acordo com a matriz mostrada a seguir:

$$\dot{\mathbf{Y}}'_{barra} = \begin{bmatrix} \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dot{Y}_{kk} - \dot{y}_l & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & \vdots & \dot{Y}_{mm} - \dot{y}_l & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ \\ m \end{matrix} \quad (3.32)$$

A Figura 3.8 representa a tensão série do SSSC junto com sua impedância e a impedância série da linha de transmissão  $km$ , sem as susceptâncias shunt da linha  $km$ . No modelo proposto neste trabalho, as susceptâncias shunt da linha  $km$  permanecem na matriz  $\mathbf{Y}'_{barra}$ .

Com essas alterações,  $p'_k$ ,  $q'_k$ ,  $p'_m$  e  $q'_m$  ficam de acordo com as expressões a seguir, calculadas com a matriz modificada  $\mathbf{Y}'_{barra}$ .

$$p'_k = \sum_{i=1}^{nb} V_k V_i Y'_{ki} \cos(\delta_k - \delta_i - \theta_{ki}) \quad (3.33)$$

$$q'_k = \sum_{i=1}^{nb} V_k V_i Y'_{ki} \sin(\delta_k - \delta_i - \theta_{ki}) \quad (3.34)$$

$$p'_m = \sum_{i=1}^{nb} V_m V_i Y'_{mi} \cos(\delta_m - \delta_i - \theta_{mi}) \quad (3.35)$$

$$q'_m = \sum_{i=1}^{nb} V_m V_i Y'_{mi} \sin(\delta_m - \delta_i - \theta_{mi}) \quad (3.36)$$

sendo  $Y'_{ki}$  e  $Y'_{mi}$  os elementos  $(k,i)$  e  $(m,i)$  da  $\mathbf{Y}'_{barra}$ .

Considerando somente o equipamento, a potência ativa consumida no lado CA do SSSC é expressa por  $p_{ca} = \text{Re}\{\dot{E}_s \dot{I}_{km}^*\}$ , também definida pela expressão a seguir.

$$p_{ca} = E_s^2 g_{km} + E_s V_k y_{km} \cos(\psi_s - \delta_k - \theta_{km}) - E_s V_m y_{km} \cos(\psi_s - \delta_m - \theta_{km}) \quad (3.37)$$

A potência  $p_{ca}$  deve ser igual à potência consumida pelo lado CC do equipamento, expressa pela Equação (2.1).

Com as equações que representam o funcionamento do SSSC derivadas nesta seção, a seguir é mostrado como inserir essas equações para análise no problema FPO.

### 3.5 Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo

Tal como o STATCOM, o SSSC introduz duas novas variáveis ao problema FPO,  $m_{ss}$  e  $\psi_s$ , referentes ao controle da magnitude de tensão e ângulo de fase da tensão  $\dot{E}_s$ , respectivamente. Também modifica as equações de balanço de potência das barras  $k$  e  $m$  e introduz as equações de controle do equipamento com seus respectivos limites de operação.

As novas equações de balanço de potência das barras  $k$  e  $m$  tornam-se, respectivamente:

$$pg_k - p_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) - pd_k - p'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (3.38)$$

$$qg_k - q_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) - qd_k - q'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (3.39)$$

$$pg_m - p_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) - pd_m - p'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (3.40)$$

$$qg_m - q_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) - qd_m - q'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (3.41)$$

Em termos vetoriais as potências ativa e reativa que circulam pela linha  $km$  podem ser expressas por:



$$\mathbf{p}_{SSSC} = \begin{bmatrix} \vdots \\ p_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \\ p_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.42)$$

$$\mathbf{q}_{SSSC} = \begin{bmatrix} \vdots \\ q_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \\ q_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.43)$$

A faixa de modulação  $m_{ss}$ , do controlador PWM, e o ângulo  $\psi_s$  da tensão controlada do VSC, são armazenadas nos vetores  $\mathbf{m}_{ss}$  e  $\boldsymbol{\Psi}_s$  na posição de origem do fluxo de potência que se deseja controlar em um valor específico. No caso do diagrama mostrado na Figura 3.8, são armazenados na posição  $k$  deste vetor, pois o fluxo a ser controlado é  $p_{km}$ . Os vetores descritos ficam da seguinte forma:

$$\mathbf{m}_{ss} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.44)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.45)$$

Os limites mínimos e máximos das variáveis  $m_{ss}$  e  $\psi_s$  são, respectivamente, definidos pelos vetores a seguir.

$$\mathbf{m}_{ss}^{min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss}^{min} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{m}_{ss}^{max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss}^{max} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.46)$$

$$\Psi_s^{min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s^{min} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad \text{e} \quad \Psi_s^{max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s^{max} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.47)$$

A potência ativa especificada é armazenada no vetor  $\mathbf{p}^{esp}$ , e as correntes  $I_{km}$  e  $I_{mk}$  no vetor  $\mathbf{i}_{SSSC}$ , conforme:

$$\mathbf{p}^{esp} = \begin{bmatrix} \vdots \\ P_{km}^{esp} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.48)$$

$$\mathbf{i}_{SSSC} = \begin{bmatrix} \vdots \\ i_{km}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \\ i_{mk}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.49)$$

E os limites de corrente do equipamento no vetor  $\mathbf{I}^{max}$  a seguir.

$$\mathbf{I}^{max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{km}^{max} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.50)$$

A Equação (2.2), de balanço de potência interna do VSC,  $p_{ca} - p_{cc} = 0$ , pode ser montada também como uma equação vetorial que represente o balanço de potência interno de cada SSSC inserido na rede de acordo com os vetores a seguir.

$$\mathbf{p}_{ca} = \begin{bmatrix} \vdots \\ P_{ca}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (3.51)$$

$$\mathbf{p}_{cc} = \begin{bmatrix} \vdots \\ p_{cc} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ \\ m \end{matrix} \quad (3.52)$$

Com as definições feitas, a formulação do FPO no problema genérico descrito na Seção 1.5.4, com a inclusão de SSSC's, altera as equações (1.22) e (1.23) da seguinte forma.

$$\mathbf{pg} - \mathbf{pd} - \mathbf{p}_{SSSC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s) - \mathbf{p}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) = \mathbf{0} \quad (3.53)$$

$$\mathbf{qg} - \mathbf{qd} - \mathbf{q}_{SSSC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s) - \mathbf{q}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) + \text{diag}(\mathbf{V}_i^2) \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (3.54)$$

Além disso, a inclusão do SSSC adiciona as equações abaixo, referentes ao controle e as restrições operacionais do equipamento.

$$\mathbf{p}_{ca}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s) - \mathbf{p}_{cc} = \mathbf{0} \quad (3.55)$$

$$\|\dot{\mathbf{i}}_{SSSC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s)\| \leq \mathbf{I}^{max} \quad (3.56)$$

$$\mathbf{p}_{SSSC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s) - \mathbf{p}^{esp} = \mathbf{0} \quad (3.57)$$

$$\mathbf{m}_{ss}^{min} \leq \mathbf{m}_{ss} \leq \mathbf{m}_{ss}^{max} \quad (3.58)$$

$$\psi_s^{min} \leq \psi_s \leq \psi_s^{max} \quad (3.59)$$

Assim como o STATCOM, a inclusão do SSSC no FPO não altera de maneira significativa o modelo genérico de FPO descrito na Seção 1.5.4. São feitas modificações nas equações de balanço de potência das barras terminais da linha onde é inserido cada equipamento e restrições referentes aos limites físicos dos equipamentos são incluídas. Pode-se observar que as novas variáveis e restrições do problema são contínuas, diferenciáveis e algumas não lineares, da mesma forma que ocorre com o problema com a representação do STATCOM.

Uma vez que o equipamento permite o controle de diferentes grandezas, a Equação (3.57), de controle de potência ativa, pode ser substituída por uma das expressões indicadas em (3.18) a (3.20). Deve-se observar, no entanto, que o equipamento permite o controle de uma grandeza por vez.

### 3.6 Conclusões

Neste capítulo, foi feito um estudo do impacto do SSSC na rede elétrica através de um exemplo composto de duas barras. Com este estudo, mostrou-se que o equipamento aumenta a capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão com vantagem em relação aos seus antecessores de primeira geração, o TCSC e o TSSC. As equações em regime permanente que representam o modelo do SSSC são derivadas e a maneira de introduzir estas expressões no FPO é mostrada com algumas alterações na matriz admitância de barras que não foram necessárias na modelagem do STATCOM. O problema FPO resultante é descrito para posteriormente ser resolvido pela mesma ferramenta numérica utilizada para no caso do FPO com STATCOM.

Os modelos do STATCOM e SSSC, descritos nos capítulos 2 e 3, respectivamente, serão utilizados na modelagem do UPFC (Unified Power Flow Controller), no próximo capítulo, pois este equipamento FACTS combina a ação série do SSSC com a ação em derivação do STATCOM.

O impacto do SSSC em sistemas de maior porte será analisado na seção de resultados.

## CAPÍTULO IV

### 4. MODELAGEM DO UPFC

#### 4.1 Introdução

Neste capítulo, é apresentado, na Seção 4.2, a descrição detalhada do equipamento FACTS de segunda geração Controlador Unificado de Fluxo de Potência (UPFC). O modelo de conversor CC-CA (VSC) usado nesse equipamento é o mesmo utilizado no STATCOM e SSSC. A Seção 4.3 apresenta a utilização e os modos de controle em que o equipamento pode operar a fim de aumentar o desempenho dos sistemas elétricos de potência. As equações que representam o modelo do UPFC em regime permanente e a maneira de inserir essas equações no FPO são apresentadas nas seções 4.4 e 4.5, respectivamente. Por fim, algumas conclusões são feitas na Seção 4.6.

#### 4.2 Descrição do Equipamento

O UPFC é constituído de dois VSC's idênticos ao descrito na Seção 2.2, que operam a partir de uma conexão CC comum. O equipamento foi concebido no início dos anos 90, sendo mais completo do que o SSSC e o STATCOM em relação ao número de grandezas que pode controlar (Gyugyi, 1990).

A representação esquemática do UPFC é mostrada na Figura 4.1. Nessa representação, o  $VSC_1$  é conectado ao sistema através de um transformador em derivação e o  $VSC_2$  é conectado através de um transformador série. Com esta estrutura, o UPFC combina a ação em paralelo do STATCOM, através do conversor em derivação, e a ação série do SSSC, através do conversor em série com a linha de transmissão. Pela configuração dos VSC's, conclui-se que o UPFC pode ser considerado como uma combinação de um STATCOM e de um SSSC, com uma conexão CC entre os equipamentos que permite trocar potência ativa entre os conversores.

Devido à utilização de dois conversores, o UPFC proporciona maior flexibilidade e controles necessários para corrigir diversos problemas que venham a interferir na capacidade de transmissão

das linhas do sistema. Através do ajuste das tensões  $\dot{V}_s$  e  $\dot{E}_s$ , o UPFC pode controlar os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e a tensão na barra onde está inserido. Por esta característica exclusiva, o equipamento ganhou o nome “Unified (Unificado)” (Hingorani e Gyugyi, 2000).

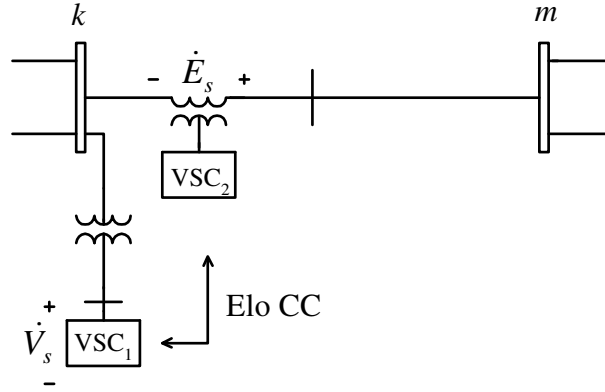


Figura 4.1 – Representação esquemática do UPFC

Na Figura 4.1, as tensões série e derivação possuem as mesmas definições usadas anteriormente, ou seja,  $\dot{E}_s = E_s \angle \psi_s$  e  $\dot{V}_s = V_s \angle \psi$ . Através do VSC série, a magnitude e o ângulo da tensão série  $\dot{E}_s$  são controlados em uma faixa de valores  $0 \leq E_s \leq E_s^{max}$  e  $0 \leq \psi_s \leq 2\pi$ , respectivamente, sendo  $\psi_s$  a mesma variável de ângulo de fase definida para a Equação (3.1). O conversor em derivação controla a magnitude e o ângulo da tensão  $\dot{V}_s$  em uma faixa de valores  $0 \leq V_s \leq V_s^{max}$  e  $0 \leq \psi \leq 2\pi$ , respectivamente, sendo  $\psi$  o ângulo de fase definida para a Equação (2.12).

O controle da magnitude e do ângulo da tensão série provoca trocas de potência ativa e reativa entre o VSC<sub>2</sub> e a rede. O VSC<sub>2</sub> pode gerar a potência reativa necessária, mas a potência ativa trocada com a rede CA corresponde a uma demanda positiva ou negativa na conexão CC, que deve ser suprida. No UPFC, essa potência ativa é fornecida pelo VSC<sub>1</sub> em derivação, que também serve para suprir suporte de potência reativa ao sistema e, com isso, proporcionar um adequado controle de tensão. A conexão CC permite somente a troca de potência ativa entre os conversores, não havendo nenhum fluxo de potência reativa nesta parte do UPFC (Cigré, 1995; Machado, 2003).

Embora a potência ativa seja trocada entre os conversores através do elo CC, a potência reativa gerada pelos conversores são independentes uma da outra. Essa característica permite uma grande flexibilidade no controle de fluxo de potência pela linha de transmissão.

A seguir são apresentadas as principais utilizações do UPFC para melhorar o desempenho dos sistemas.

### 4.3 Utilização do UPFC

A Figura 4.2 representa o circuito equivalente da conexão mostrada na Figura 4.1. A fonte de tensão em série com a linha de transmissão tem a função de controlar o fluxo de potência ativa e reativa na linha, enquanto a fonte de tensão em derivação absorve ou gera potência reativa a fim de controlar a tensão da barra onde o UPFC está inserido.

Utilizando a Figura 4.2 pode-se mostrar como o UPFC modifica o desempenho do sistema de transmissão.

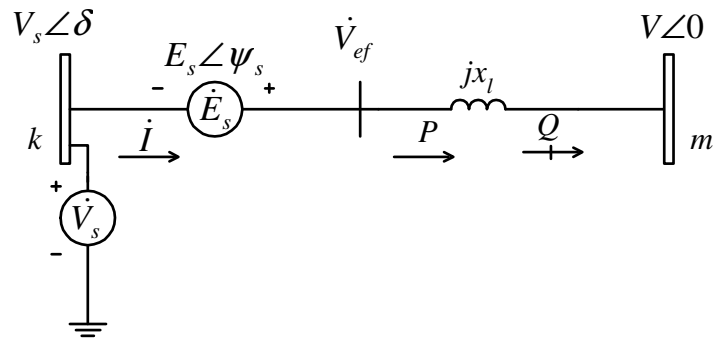


Figura 4.2 – Sistema com UPFC

A tensão  $\dot{V}_{ef}$  nos terminais do UPFC é expressa pela seguinte equação:

$$\dot{V}_{ef} = \dot{V}_s + \dot{E}_s \quad (4.1)$$

Sendo assim, a corrente que chega aos terminais da barra  $m$  é expressa pela equação a seguir.

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_{ef} - \dot{V}}{jx_l} = \frac{\dot{V}_s + \dot{E}_s - \dot{V}}{jx_l} \quad (4.2)$$

A potência complexa,  $\dot{S}$ , que sai da barra  $m$  é calculada como:

$$\dot{S} = \dot{V}(-\dot{I})^* = \dot{V} \left( \frac{\dot{V} - \dot{V}_s - \dot{E}_s}{jx_l} \right)^* \quad (4.3)$$

Se  $\dot{E}_s = 0$ , então a Equação (4.3) descreve o sistema da Figura 4.2 sem compensação série.

Se  $\dot{E}_s \neq 0$ , tem-se:

$$\dot{S} = j\dot{V}\left(\frac{\dot{V}^* - \dot{V}_s^*}{x_l}\right) - j\frac{\dot{V}\dot{E}_s^*}{x_l} \quad (4.4)$$

$$\dot{S} = j\frac{(V^2 - \dot{V}\dot{V}_s^*)}{x_l} - j\frac{\dot{V}\dot{E}_s^*}{x_l} \quad (4.5)$$

$$\dot{S} = j\left[\frac{V^2 - VV_s\cos(\delta) + jVV_s\sin(\delta)}{x_l}\right] - j\left[\frac{VE_s\cos(\psi_s) - jVE_s\sin(\psi_s)}{x_l}\right] \quad (4.6)$$

$$\dot{S} = -\left[\frac{VV_s\sin(\delta) + VE_s\sin(\psi_s)}{x_l}\right] - j\left[\frac{VV_s\cos(\delta) - V^2 + VE_s\cos(\psi_s)}{x_l}\right] \quad (4.7)$$

As potências ativa e reativa que entram na barra  $m$  são, respectivamente, o negativo da parte real e imaginária da Equação (4.7) e ficam da seguinte forma:

$$P = \frac{VV_s}{x_l}\sin\delta + \frac{VE_s}{x_l}\sin(\psi_s) = P_0 + \frac{VE_s}{x_l}\sin(\psi_s) \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{VV_s\cos(\delta) - V^2}{x_l} + \frac{VE_s}{x_l}\cos(\psi_s) = Q_0 + \frac{VE_s}{x_l}\cos(\psi_s) \quad (4.9)$$

sendo

$P_0$  a potência ativa fornecida pelo sistema não compensado;

$Q_0$  a potência reativa fornecida pelo sistema não compensado.

Devido ao ângulo  $\psi_s$  ser variável entre 0 e  $2\pi$ , a potência ativa transmissível é controlável entre

$$P_0 - \frac{VE_s^{max}}{x_l} \leq P \leq P_0 + \frac{VE_s^{max}}{x_l} \quad (4.10)$$

e a potência reativa  $Q$  é controlável entre

$$Q_0 - \frac{VE_s^{max}}{x_l} \leq Q \leq Q_0 + \frac{VE_s^{max}}{x_l} \quad (4.11)$$

em qualquer ângulo de transmissão  $\delta$ , sendo  $E_s^{max}$  a máximo valor de amplitude de  $\dot{E}_s$ . A ampla faixa de operação no controle da potência transmitida, independente do ângulo de transmissão  $\delta$ , indica uma grande capacidade no controle de fluxo de potência conforme mostrado nas figuras 4.3 e 4.4. Essa característica também sugere uma grande capacidade de ampliar os limites de



estabilidade dinâmica devido ao aumento da margem de estabilidade transitória (Almeida e Silveira, 2006).

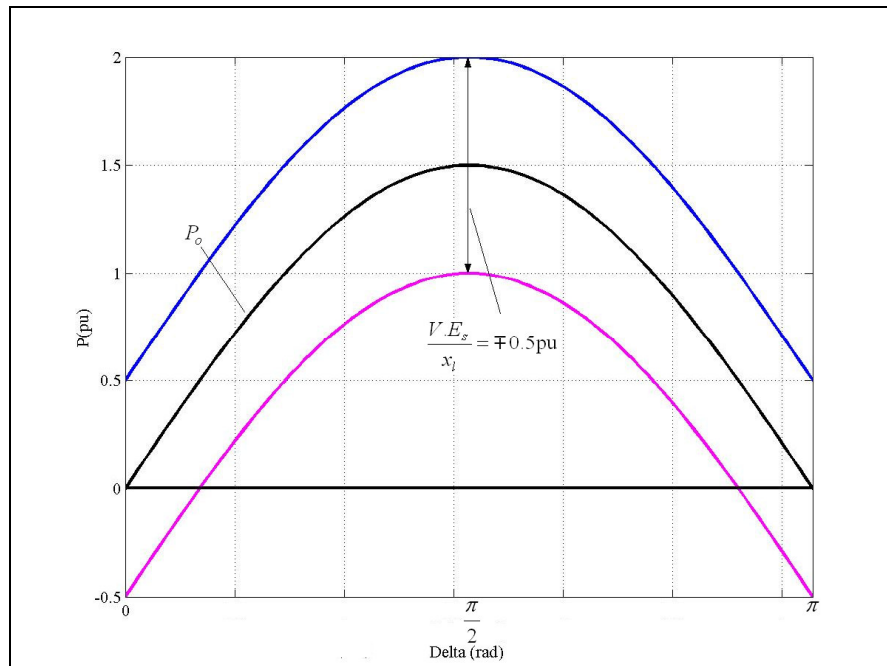


Figura 4.3 – Transferência de potência ativa com UPFC em função de  $\delta$

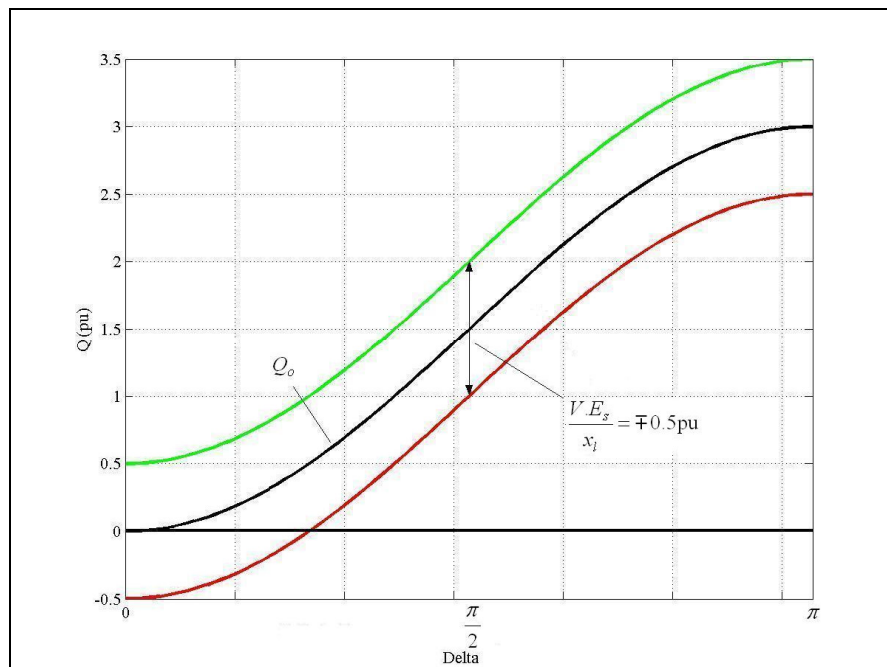


Figura 4.4 – Transferência de potência reativa com UPFC em função de  $\delta$

Comparando a Figura 4.3 com a Figura 3.3, onde é plotada a variação da potência transmitida em função do ângulo  $\delta$  na presença do SSSC, notam-se diferenças nas curvas formadas. Da mesma forma que ambos os equipamentos possuem a capacidade de inverter o fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão, as curvas  $P \times \delta$  do UPFC têm um decréscimo bem menos acentuado na região  $\pi/2 < \delta < \pi$  e se deslocam paralelamente à curva original sem compensação.

O UPFC pode controlar a potência ativa na linha em um valor especificado de acordo com a equação de controle:

$$p_{km} - p_{km}^{esp} = 0 \quad (4.12)$$

Além de aumentar, ou diminuir, a capacidade de transferência de potência ativa, o UPFC também permite controlar o fluxo de potência reativa, dentro dos limites mostrados na Figura 4.4, e a tensão da barra de origem dos fluxos de acordo com as equações de controle mostradas abaixo:

$$q_{km} - q_{km}^{esp} = 0 \quad (4.13)$$

$$V_k = V_k^{esp} + x'_{sl} q_s \quad (4.14)$$

sendo  $x'_{sl}$ , a inclinação da reta que representa a faixa de controle linear do equipamento, válida dentro de faixas específicas de injeção de potência reativa pelo conversor em derivação, tal como mostrado na Figura 2.3.

Deve-se observar que, sendo o UPFC uma combinação do STATCOM e SSSC, os limites de corrente desses dois equipamentos influenciam na capacidade de compensação do UPFC.

Devido ao UPFC combinar o efeito shunt do STATCOM com o efeito série do SSSC, o equipamento permite o aumento da margem de estabilidade pelo controle adequado do elemento série e pela ação do elemento shunt na manutenção da tensão da barra, tendo a capacidade de adicionar amortecimento através do controle combinado dos dois conversores. Sendo assim, o equipamento serve para melhorar o desempenho do sistema, tanto para estabilidade angular, quanto para estabilidade de tensão. Portanto, um maior carregamento do sistema pode ser alcançado devido ao significativo aumento nas margens de estabilidade de tensão que o equipamento proporciona (Chen, Wang e Zhou, 2000; Natesan e Radman, 2004).

A seguir são derivadas as equações que representam o UPFC em regime permanente.

#### 4.4 Equações do UPFC em Regime Permanente

A Figura 4.5 apresenta o circuito equivalente do UPFC mostrado na representação esquemática da Figura 4.1. Os conversores  $VSC_1$  e  $VSC_2$  são equivalentados pelas fontes de tensão  $\dot{V}_s$  e  $\dot{E}_s$  combinadas às impedâncias dos transformadores de acoplamento em derivação e série, respectivamente. Esse circuito será usado para derivar as expressões que representam o funcionamento do equipamento em regime permanente (Radman e Raje, 2006; Almeida et al., 2007). Posteriormente essas expressões e as equações de controle do equipamento, mostradas na seção anterior, serão inseridas no problema FPO.

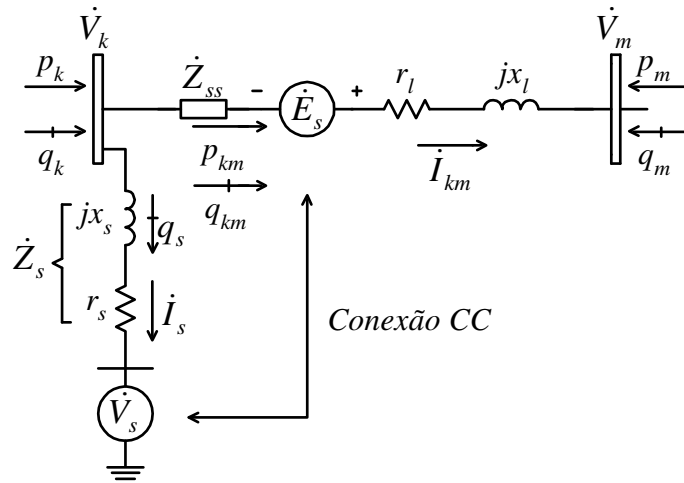


Figura 4.5 – Circuito equivalente do UPFC

As grandezas representadas na Figura 4.5 são definidas conforme descrito a seguir.

$\dot{V}_k$  e  $\dot{V}_m$ : tensões das barras terminais,  $k$  e  $m$ , da linha onde o equipamento está inserido;

$r_l$  e  $x_l$ : parâmetros da linha de transmissão;

$p_k$  e  $p_m$ : injeção de potência ativa na barra  $k$  e  $m$ , respectivamente;

$q_k$  e  $q_m$ : injeção de potência reativa na barra  $k$  e  $m$ , respectivamente.

Com relação ao elemento em derivação do UPFC mostrado na Figura 4.5, as grandezas representadas são definidas conforme a seguir:

$q_s$  potência reativa fornecida ou absorvida pelo conversor em derivação;

$\dot{I}_s$  corrente injetada no conversor em derivação;

$\dot{V}_s$  tensão controlada nos terminais do conversor em derivação;

$\dot{Z}_s$  impedância do transformador de acoplamento do conversor em derivação à rede.

As grandezas referentes ao conversor em série na Figura 4.5 são:

$\dot{I}_{km}$  corrente circulando pela linha de transmissão;

$p_{km}$  fluxo de potência ativa controlada na linha de transmissão;

$q_{km}$  fluxo de potência reativa controlada na linha de transmissão;

$\dot{E}_s$  tensão controlada nos terminais do conversor em série com a linha de transmissão;

$\dot{Z}_{ss}$  impedância do transformador de acoplamento do conversor em série à rede.

A admitância total do ramo série da Figura 4.5, ou seja, o resultado equivalente das admitâncias série do UPFC,  $\dot{y}_{ss}$ , e da linha,  $\dot{y}_l$ , onde o equipamento está instalado é definida por:

$$\dot{y}_{km} = \dot{y}_{ss} + \dot{y}_l = y_{km} \angle \theta_{km} = g_{km} + b_{km} \quad (4.15)$$

sendo  $g_{km}$  e  $b_{km}$ , a condutância e a susceptância total do ramo série, respectivamente. Para o ramo em derivação tem-se:

$$\dot{y}_s = y_s \angle \theta_s = g_s + b_s \quad (4.16)$$

sendo  $g_s$  e  $b_s$ , a condutância e a susceptância do transformador em derivação conectado à rede.

A corrente entre as barras  $k$  e  $m$ ,  $\dot{I}_{km}$ , pode ser expressa pela soma da corrente no ramo paralelo e no ramo série. A partir do circuito equivalente tem-se:

$$\dot{I}_{km} = (\dot{V}_k + \dot{E}_s - \dot{V}_m) \dot{y}_{km} + (\dot{V}_k - \dot{V}_s) \dot{y}_s \quad (4.17)$$

e

$$\dot{I}_{mk} = (\dot{V}_m - \dot{E}_s - \dot{V}_k) \dot{y}_{km} \quad (4.18)$$

sendo

$$\dot{V}_s = k_s m_s V_{cc} \angle \psi \quad (4.19)$$

e

$$\dot{E}_s = k_{ss} m_{ss} V_{ccs} \angle \psi_s \quad (4.20)$$

Sendo as variáveis utilizadas nas equações anteriores definidas como:

$k_s$  e  $k_{ss}$  ganho dos conversores mais taxa de elevação dos transformadores;

$m_s$  e  $m_{ss}$  faixa de modulação do PWM dos conversores;

$V_{cc}$  e  $V_{ccs}$  magnitude do lado CC dos conversores;

$\Psi$  e  $\Psi_s$  ângulo da tensão controlada pelos conversores VSC's.

A corrente  $\dot{I}_s$  injetada pelo conversor em derivação é definida de acordo com a equação a seguir.

$$\dot{I}_s = (\dot{V}_k - \dot{V}_s) \dot{Y}_s \quad (4.21)$$

A potência complexa que circula pela linha de transmissão no sentido da barra  $k$  para a barra  $m$  é definida por  $\dot{S}_{km} = \dot{V}_k \dot{I}_{km}^*$ , e as expressões de potência ativa e reativa na linha são, respectivamente:

$$p_{km} = \text{Re}\{\dot{S}_{km}\} = V_k^2(g_{km} + g_s) - V_k V_m y_{km} \cos(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + V_k k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \cos(\delta_k - \Psi_s - \theta_{km}) - V_k k_s m_s V_{cc} y_s \cos(\delta_k - \Psi - \theta_s) \quad (4.22)$$

$$q_{km} = \text{Im}\{\dot{S}_{km}\} = -V_k^2(b_{km} + b_s) - V_k V_m y_{km} \sin(\delta_k - \delta_m - \theta_{km}) + V_k k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \sin(\delta_k - \Psi_s - \theta_{km}) - V_k k_s m_s V_{cc} y_s \sin(\delta_k - \Psi - \theta_s) \quad (4.23)$$

Para o sentido da barra  $m$  para a barra  $k$ ,  $\dot{S}_{mk} = \dot{V}_m \dot{I}_{mk}^*$ , e as expressões de potência ativa e reativa na linha são, respectivamente:

$$p_{mk} = \text{Re}\{\dot{S}_{mk}\} = V_m^2 g_{km} - V_m V_k y_{km} \cos(\delta_m - \delta_k - \theta_{km}) - V_m k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \cos(\delta_m - \Psi_s - \theta_{km}) \quad (4.24)$$

$$q_{mk} = \text{Im}\{\dot{S}_{mk}\} = -V_m^2 b_{km} - V_m V_k y_{km} \sin(\delta_m - \delta_k - \theta_{km}) - V_m k_{ss} m_{ss} V_{ccs} y_{km} \sin(\delta_m - \Psi_s - \theta_{km}) \quad (4.25)$$

Com estas equações, as injeções de potência ativa e reativa na barra  $k$  são expressas, respectivamente, por:

$$p_k = p_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) + p'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.26)$$

$$q_k = q_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) + q'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.27)$$

sendo

$$p'_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{nb} p_{ki}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.28)$$

$$q'_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{nb} q_{ki}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.29)$$

onde  $p_{ki}$  e  $q_{ki}$  são os fluxos de potência ativa e reativa na linha  $(k-i)$ .

De forma análoga, para a barra  $m$ :

$$p_m = p_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) + p'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.30)$$

$$q_m = q_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) + q'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.31)$$

sendo

$$p'_m = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{nb} p_{mi}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.32)$$

$$q'_m = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{nb} q_{mi}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (4.33)$$

Os somatórios das equações anteriores representam as injeções de potência nas barras  $k$  e  $m$  sem os fluxos ativo e reativo na linha  $km$ , que são expressos pelas equações (4.22) à (4.25). Nota-se que este modelo é semelhante ao proposto para a representação do SSSC em regime permanente na Seção 3.4. No entanto, o fato do UPFC ser composto por dois VSC's, unificando as características do STATCOM e do SSSC, os fluxos  $p_{km}$ ,  $q_{km}$ ,  $p_{mk}$  e  $q_{mk}$  são dependentes das variáveis  $\Psi$  e  $m_s$  do conversor em derivação e  $\Psi_s$  e  $m_{ss}$  do conversor em série, além dos ângulos e das tensões das barras terminais onde o equipamento está conectado.

A potência reativa  $q_s$ , que controla a tensão da barra  $k$  de acordo com a Equação (4.14), é expressa por:

$$q_s = \text{Im}\{\dot{S}_s\} = [V_k^2 \text{sen}\beta - V_k k_s m_s V_{cc} \text{sen}(\delta_k - \psi + \beta)] y_s \quad (4.34)$$

Para que o balanço de potência interno do equipamento seja mantido, a potência consumida pelo ramo série deve ser suprida pelo ramo em derivação, ou vice-versa, através da conexão CC existente entre os dois conversores. Portanto,

$$P_{int} = \text{Re}\{\dot{V}_s^T \dot{I}_s^*\} - \text{Re}\{\dot{E}_s^T \dot{I}_{km}^*\} = 0 \quad (4.35)$$

ou

$$P_{int} = -g_{km}(k_{ss}m_{ss}V_{ccs})^2 - g_s(k_s m_s V_{cc})^2 + y_s k_s m_s V_{cc} V_k \cos(\psi - \delta_k - \theta_s) + \\ - y_{km} k_{ss} m_{ss} V_{ccs} V_k \cos(\psi_s - \delta_k - \theta_{km}) + y_{km} k_{ss} m_{ss} V_{ccs} V_m \cos(\psi_s - \delta_m - \theta_{km}) = 0. \quad (4.36)$$

As equações anteriores juntamente com as equações de controle do UPFC mostradas na Seção 4.3 devem ser introduzidas no problema FPO com as restrições que representam os limites do equipamento. Essas restrições serão detalhadas na seção a seguir.

## 4.5 Modelagem no Fluxo de Potência Ótimo

A introdução das equações que representam o modelo do UPFC em regime permanente no problema de Fluxo de Potência Ótimo não apresenta grandes dificuldades. Porém, alterações devem ser feitas na matriz admitância de barras original do sistema,  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$ , devido à necessidade de expressar separadamente os fluxos ativo e reativo na linha com UPFC, pois esses dependem dos parâmetros do equipamento.

A matriz  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$  original do sistema é definida por:

$$\dot{\mathbf{Y}}_{barra} = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ \vdots & \dot{y}_{kk} & \cdots & -\dot{y}_l & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ \vdots & -\dot{y}_l & \vdots & \dot{y}_{mm} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.37)$$

Neste caso,  $\dot{y}_l$  representa a admitância da linha de transmissão entre as barras  $k$  e  $m$  onde será introduzido o UPFC.

Sendo assim, precisa-se subtrair a admitância série da linha de transmissão  $km$  dos elementos diagonais da matriz  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$  e anular as admitâncias de transferência das posições  $km$  e  $mk$  da  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$  original, gerando uma matriz auxiliar  $\dot{\mathbf{Y}}'_{barra}$  de acordo com a matriz mostrada a seguir:

$$\dot{\mathbf{Y}}'_{barra} = \begin{bmatrix} \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dot{y}_{kk} - \dot{y}_l & \dots & 0 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0 & \vdots & \dot{y}_{mm} - \dot{y}_l & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.38)$$

A Figura 4.5 representa as fontes de tensão, paralela e em derivação, junto com as respectivas impedâncias dos transformadores de acoplamento à rede CA. Os elementos em derivação das barras  $k$  e  $m$  (susceptâncias de linha e admitância em derivação do UPFC) ficam representados na matriz de admitância de barras modificada  $\dot{\mathbf{Y}}'_{barra}$ . Uma nova matriz de admitâncias, que representa somente as admitâncias série dos UPFC's inseridos na rede e da linha onde os equipamentos são conectados, é formada conforme exposto a seguir:

$$\dot{\mathbf{Y}}_{UPFC} = \begin{bmatrix} \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \dot{y}_{km} & \dots & -\dot{y}_{km} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \dots \\ \vdots & -\dot{y}_{km} & \vdots & \dot{y}_{km} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.39)$$

sendo  $\dot{y}_{km}$  definida pela Equação (4.15).

O UPFC introduz ao problema FPO genérico, descrito na Seção 1.5.4, cinco novas variáveis. As variáveis  $m_{ss}$  e  $\Psi_s$ , referentes ao controle da magnitude de tensão e ângulo de fase do conversor em série com a linha de transmissão  $km$ ;  $m_s$  e  $\Psi$ , referentes ao controle da magnitude de tensão e ângulo de fase do conversor em derivação com o sistema CA e  $V_k^{esp}$ , referente ao controle de tensão da barra  $k$ .

A introdução do UPFC modifica as equações de balanço de potência das barras  $k$  e  $m$  e introduz as equações de controle do equipamento com seus respectivos limites de operação. As novas equações de balanço de potência das barras  $k$  e  $m$  tornam-se, respectivamente:

$$pg_k - p_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) - p_s(V_k, \delta_k, m_s, \Psi) - pd_k - p'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (4.40)$$

$$qg_k - q_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) - q_s(V_k, \delta_k, m_s, \Psi) - qd_k - q'_k(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (4.41)$$

$$pg_m - p_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) - pd_m - p'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (4.42)$$

$$qg_m - q_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \Psi_s, m_s, \Psi) - qd_m - q'_m(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) = 0 \quad (4.43)$$



Em termos vetoriais as potências ativa e reativa que circulam pela linha  $km$  devido à presença do UPFC podem ser expressas por:

$$\mathbf{p}_{UPFC} = \begin{bmatrix} \vdots \\ p_{km}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) \\ \vdots \\ p_{mk}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.44)$$

$$\mathbf{q}_{UPFC} = \begin{bmatrix} \vdots \\ q_{km}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) \\ \vdots \\ q_{mk}(\mathbf{V}, \delta, m_{ss}, \psi_s, m_s, \psi) \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.45)$$

Da mesma forma que foi feita na representação do SSSC, as injeções de potência ativa nas barras  $k$  e  $m$ ,  $p'_k$  e  $p'_m$ , e reativa,  $q'_k$  e  $q'_m$ , definidas pelas equações (4.30) à (4.33) são calculadas com a matriz de admitância de barra modificada  $\mathbf{Y}'_{barra}$ .

As variáveis  $m_s$ ,  $m_{ss}$ ,  $\Psi$  e  $\Psi_s$  são armazenadas na posição  $k$  dos vetores descritos a seguir, pois os fluxos  $p_{km}$  e  $q_{km}$ , a serem controlados em valores pré especificados, têm sentido da barra  $k$  para a barra  $m$  e a tensão da barra  $k$  controlada pelo conversor em derivação. Definem-se, portanto, os seguintes vetores:

$$\mathbf{m}_s = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_s \\ \vdots \\ \vdots \\ m \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{m}_{ss} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.46)$$

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi \\ \vdots \\ \vdots \\ m \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{\Psi}_s = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} k \\ m \end{matrix} \quad (4.47)$$

Os limites mínimos e máximos das variáveis  $m_s$ ,  $m_{ss}$ ,  $\Psi$  e  $\Psi_s$  são, respectivamente, definidos pelos vetores a seguir.

$$\mathbf{m}_s^{\min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_s^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k, \mathbf{m}_s^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_s^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k, \mathbf{m}_{ss}^{\min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss}^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \text{ e } \mathbf{m}_{ss}^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ m_{ss}^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \quad (4.48)$$

$$\boldsymbol{\psi}^{\min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k, \boldsymbol{\psi}^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k, \boldsymbol{\psi}_s^{\min} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s^{\min} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \text{ e } \boldsymbol{\psi}_s^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \psi_s^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \quad (4.49)$$

As potências ativa e reativa especificadas são armazenadas nos vetores  $\mathbf{p}^{\text{esp}}$  e  $\mathbf{q}^{\text{esp}}$  conforme descrito a seguir.

$$\mathbf{p}^{\text{esp}} = \begin{bmatrix} \vdots \\ p_{km}^{\text{esp}} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \text{ e } \mathbf{q}^{\text{esp}} = \begin{bmatrix} \vdots \\ q_{km}^{\text{esp}} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \quad (4.50)$$

As correntes que circulam pelo conversor em série e derivação são armazenadas, respectivamente, nos vetores  $\dot{\mathbf{I}}_{\text{série}}$  e  $\dot{\mathbf{I}}_{\text{deriv}}$  conforme:

$$\dot{\mathbf{I}}_{\text{série}} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dot{I}_{km}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \boldsymbol{\psi}_s, m_s, \boldsymbol{\psi}) \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{I}_{mk}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, m_{ss}, \boldsymbol{\psi}_s, m_s, \boldsymbol{\psi}) \\ \vdots \end{bmatrix} k \text{ e } \dot{\mathbf{I}}_{\text{deriv}} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \dot{I}_s(V_k, \boldsymbol{\delta}_k, m_s, \boldsymbol{\psi}) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} k \quad (4.51)$$

Para não sobrecarregar os conversores do UPFC, e danificar o equipamento, é necessário respeitar os limites de correntes de ambos os conversores, expressos pelos vetores abaixo:

$$\mathbf{I}_{\text{série}}^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{\text{série}}^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \text{ e } \mathbf{I}_{\text{deriv}}^{\max} = \begin{bmatrix} \vdots \\ I_{\text{deriv}}^{\max} \\ \vdots \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} k \quad (4.52)$$

A introdução do UPFC no problema FPO altera as equações de balanço de potência do modelo, que passam a ser escritas conforme as seguintes equações:

$$\mathbf{pg} - \mathbf{pd} - \mathbf{p}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{ps}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{p}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) = \mathbf{0} \quad (4.53)$$

$$\mathbf{qg} - \mathbf{qd} - \mathbf{q}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{qs}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{q}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) + \text{diag}(\mathbf{V}_i^2) \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (4.54)$$

Além disso, a inclusão do UPFC adiciona as equações abaixo, referentes aos controles e restrições operacionais do equipamento.

$$\mathbf{p}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{p}^{esp} = \mathbf{0} \quad (4.55)$$

$$\mathbf{q}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{q}^{esp} = \mathbf{0} \quad (4.56)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^{esp} + \mathbf{x}'_{sl} \mathbf{qs} \quad (4.57)$$

$$\mathbf{P}_{int} = \text{Re}\{\dot{\mathbf{V}}_s^T \dot{\mathbf{I}}_{deriv}^*\} - \text{Re}\{\dot{\mathbf{E}}_s^T \mathbf{I}_{serie}^*\} = \mathbf{0} \quad (4.58)$$

$$|\dot{\mathbf{I}}_{serie}| \leq \mathbf{I}_{serie}^{max} \quad (4.59)$$

$$|\dot{\mathbf{I}}_{deriv}| \leq \mathbf{I}_{deriv}^{max} \quad (4.60)$$

$$\mathbf{m}_s^{min} \leq \mathbf{m}_s \leq \mathbf{m}_s^{max} \quad (4.61)$$

$$\mathbf{m}_{ss}^{min} \leq \mathbf{m}_{ss} \leq \mathbf{m}_{ss}^{max} \quad (4.62)$$

$$\psi_s^{min} \leq \psi_s \leq \psi_s^{max} \quad (4.63)$$

$$\psi^{min} \leq \psi \leq \psi^{max} \quad (4.64)$$

Os vetores utilizados nas equações (4.57) e (4.58) são definidos conforme o descrito a seguir.

$\mathbf{V}^{esp}$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $V_k^{esp}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{x}'_{sl}$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $x'_{sl}$  na posição  $k$ ;

$\mathbf{qs}$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $q_s$  na posição  $k$ ;

$\dot{\mathbf{V}}_s$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $\dot{V}_s$  na posição  $k$ ;

$\dot{\mathbf{E}}_s$ : vetor de dimensão  $(nb \times I)$  com  $\dot{E}_s$  na posição  $k$ ;

sendo  $nupfc$  o número de UPFC's inseridos no sistema.

Observa-se que as novas restrições do FPO possuem as mesmas características das restrições originais, ou seja, são contínuas, diferenciáveis e algumas não lineares.

Assim como o STATCOM e o SSSC, a inclusão do UPFC no FPO não altera de maneira significativa o modelo genérico apresentado na Seção 1.5.4. Novamente, são feitas alterações nas equações de balanço de potência das barras terminais que interligam o equipamento. As restrições em relação aos limites físicos dos conversores que compõem o equipamento são incluídas e as equações de controle são inseridas.

## 4.6 Conclusões

Neste capítulo, foi feito um estudo do impacto do UPFC na rede elétrica através de um exemplo composto por duas barras. Com este estudo, mostrou-se que o equipamento aumenta a capacidade de transferência de potência dos circuitos com vantagens em relação aos outros equipamentos modelados nesta dissertação, pois possui maior capacidade de controle. Observa-se que o UPFC unifica os controles disponíveis no STATCOM e SSSC e, adicionalmente, permite controlar o fluxo de potência reativa nas linhas.

Com o objetivo de analisar o impacto do UPFC na operação em regime permanente, derivou-se um modelo genérico para este equipamento baseado em injeções de potência. Esse modelo foi introduzido no FPO. Observa-se que, assim como ocorreu com os outros equipamentos estudados, não há uma grande alteração nas características do problema FPO quando o UPFC é representado.

O impacto do equipamento em sistemas de maior porte será analisado na seção de resultados.

## CAPÍTULO V

### 5. USO DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO NA ANÁLISE DO POTENCIAL DE EQUIPAMENTOS FACTS

#### 5.1 Introdução

Este capítulo descreve uma metodologia, baseada no conceito de regiões de segurança, para a avaliação do potencial de equipamentos FACTS para melhorar as condições operativas dos sistemas. Inicialmente é apresentado, na Seção 5.2, um modelo genérico de Fluxo de Potência Ótimo com equipamentos FACTS. A seguir, na Seção 5.3, são derivados índices de sensibilidade para a alocação de equipamentos FACTS derivados do modelo genérico do FPO. A Seção 5.4 apresenta o conceito de Regiões de Segurança dos sistemas de potência. Esse conceito é empregado para mensurar o impacto dos equipamentos FACTS nos sistemas através da resolução do FPO. Na Seção 5.5 é mostrada a influência dos equipamentos FACTS nas regiões de segurança, e por fim, na Seção 5.6, são feitas algumas conclusões.

#### 5.2 Modelo Genérico de Fluxo de Potência Ótimo com FACTS

O problema FPO completo, com a inserção dos equipamentos FACTS de segunda geração modelados nesta dissertação, é formulado detalhadamente no Apêndice A. Pode-se observar que a estrutura básica do problema se mantém. Sendo assim, a formulação genérica para o FPO com representação de equipamentos FACTS é idêntica à descrita pelas equações (1.18)-(1.20), ou seja:

$$\min \quad f(\mathbf{x}) \quad (5.1)$$

$$\text{sujeito a} \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}^{\text{lim}} \quad (5.3)$$

sendo o vetor  $\mathbf{x}$  representado por todas as variáveis originais do sistema de potência, incluindo suas cargas, gerações, tensões, fluxos nas linhas e variáveis de controle dos equipamentos FACTS. O vetor  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  representa as equações que satisfazem aos balanços de fluxo de potência das barras do sistema e  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  representa os limites físicos e operacionais considerando os equipamentos FACTS na rede.

As funções objetivo utilizadas neste trabalho incluem a minimização do desvio quadrático de tensão em relação a 1.0 pu (DT), minimização de perdas (LO) e maximização de transferência de potência (TP). A função objetivo TP foi a mais utilizada para avaliar o impacto dos equipamentos FACTS na capacidade de transferência de potência dos sistemas. Sua formulação completa encontra-se no Apêndice A. As outras funções objetivo foram mais utilizadas para avaliar o desempenho do algoritmo com a inserção de equipamentos FACTS.

O problema FPO foi resolvido pelo método primal-dual de Pontos Interiores. O Apêndice B faz uma breve descrição desse método.

O uso de programas de Fluxo de Potência Ótimo na análise do potencial de equipamentos FACTS para a melhoria da condição operativa de sistemas de potência tem as seguintes vantagens.

- Como subproduto do processo de otimização obtém-se fatores de sensibilidade que podem ser usados para determinar bons locais de inserção de equipamentos FACTS na rede.
- A melhoria da condição operativa é avaliada segundo critérios de desempenho e considerando um conjunto de restrições definidas pelo analista.
- É possível se obter uma visão geral, e não apenas localizada, da melhoria das condições de operação do sistema.

Na próxima seção são derivados os fatores de sensibilidade usados neste trabalho para a escolha de bons locais de instalação de equipamentos FACTS. Na Seção 5.4 é mostrado o uso do FPO para avaliar o impacto dos equipamentos na condição global de operação do sistema empregando-se o conceito de Região de Segurança.

### 5.3 Índices de Sensibilidade para alocação de FACTS

Uma boa localização dos equipamentos FACTS é necessária para que possam melhorar o desempenho do sistema. Indicadores que mostrem o melhor ponto para a inserção desses

equipamentos são fundamentais, uma vez que em sistemas de grande porte existem usualmente inúmeros locais possíveis de instalação.

São mostrados, nesta seção, os indicadores para alocação de equipamentos FACTS baseado em subprodutos do processo de otimização. Esses indicadores são derivados a partir das condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) do problema (5.1)-(5.3).

Montando a função Lagrangeana do problema (5.1)-(5.3) obtém-se a seguinte expressão:

$$L(x) = f(x) + \sum_{k=1}^{ne} \lambda_k g_k(x) + \sum_{l=1}^{nd} [\pi_l h_l(x) - h_l^{lim}] \quad (5.4)$$

sendo

$ne$  o número de restrições de igualdade do sistema;

$nd$  o número de restrições de desigualdade do sistema;

$\pi$  os multiplicadores de Lagrange associados as restrições de desigualdade;

$\lambda$  os multiplicadores de Lagrange associados as restrições de igualdade.

As condições de otimalidade de primeira ordem de KKT estipulam que para um ponto factível ser candidato a ótimo deve satisfazer necessariamente (Bazaraa e Shetty, 1979):

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = 0 \quad (5.5)$$

$$\pi_l h_l(x) = 0, \quad l = 1 \dots nd \quad (5.6)$$

$$\pi_l \geq 0, \quad l = 1 \dots nd \quad (5.7)$$

Da Equação (5.5) tem-se:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = - \sum_{k=1}^{ne} \lambda_k \frac{\partial g_k(x)}{\partial x} - \sum_{l=1}^{nd} \pi_l \frac{\partial h_l(x)}{\partial x} \quad (5.8)$$

A sensibilidade da função objetivo em relação ao limite  $h_k^{lim}$  é expressa por:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial h_k^{lim}} = \frac{\partial}{\partial h_k^{lim}} [f(x)] \quad (5.9)$$

ou ainda

$$\frac{\partial f(x)}{\partial h_k^{\lim}} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial h_k^{\lim}} \quad (5.10)$$

Substituindo a Equação (5.8) na Equação (5.10) e simplificando obtêm-se:

$$\frac{df(x)}{dh_k^{\lim}} = -\sum_{k=1}^{ne} \lambda_k \frac{dg_k(x)}{dh_k^{\lim}} - \sum_{l=1}^{nd} \pi_l \frac{dh_l(x)}{dh_k^{\lim}} \quad (5.11)$$

O primeiro termo do lado direito da Equação (5.11) é nulo, pois  $\frac{dg_k(x)}{dh_k^{\lim}} = 0$ . Tendo em vista a Equação (5.3), pode-se observar que  $\frac{dh_l(x)}{dh_k^{\lim}} = 0$  para  $l \neq k$  e igual a  $\frac{dh_k(x)}{dh_k^{\lim}} = 1$ . Sendo assim, a Equação (5.11) torna-se:

$$\frac{df(x)}{dh_k^{\lim}} = -\pi_k \quad (5.12)$$

Com isso, conclui-se que a sensibilidade da função objetivo em relação aos limites impostos a cada restrição  $h_l(x)$  é o multiplicador de Lagrange associado a cada restrição  $\pi_l$ . Então se  $h(x)_i \leq h_i^{\lim}$  corresponder a  $V_i \leq V_i^{\max}$ , sendo  $V_i$  a tensão na barra  $i$ , o multiplicador de Lagrange associado ao limite máximo de tensão,  $\pi_{V_i}$ , será a sensibilidade da função objetivo em relação a  $V_i^{\max}$ . Da mesma forma, se  $h(x)_j \leq h_j^{\lim}$  corresponder a  $fl_j \leq fl_j^{\max}$ , sendo  $fl_j$  o fluxo na linha  $j$  da rede,  $\pi_{fl_j}$  é a sensibilidade da função objetivo em relação a  $fl_j^{\max}$ .

Como são sensibilidades em relação a limites impostos na operação, os multiplicadores de Lagrange podem ser usados para indicar locais para a introdução de equipamentos FACTS. A eficácia desses indicadores é analisada no capítulo de resultados.

Alguns pontos devem ser ressaltados em relação aos estudos sobre alocação ótima de equipamentos FACTS. Em primeiro lugar, deve-se notar que os multiplicadores de Lagrange se alteram de acordo com as condições operativas do sistema e, portanto, devem ser testadas várias dessas condições operativas para uma boa localização dos equipamentos FACTS. Em segundo lugar, deve-se observar que os multiplicadores de Lagrange indicam locais críticos da rede onde há limites operativos ativos, ou seja, uma barra ou linha que não possua grandezas nos limites não será indicada para a inserção dos equipamentos. Indicadores mais genéricos podem ser obtidos a partir da derivação de índices de sensibilidade calculados pelas equações de fluxo de carga (Monticelli, 1983). Entretanto, é importante notar que, de forma mais genérica, estudos de planejamento da



transmissão devem ser empregados para a escolha dos locais mais apropriados para os equipamentos FACTS.

## 5.4 Conceito de Regiões de Segurança

Os sistemas de potência são modelados, na condição de operação em regime permanente, pelas equações de fluxo de potência e por um conjunto de restrições de desigualdade impostas por limites operacionais e físicos de seus componentes. Através do conceito de região de segurança, pode-se fazer uma avaliação teórica de quão segura é a operação de um sistema.

Se um vetor  $\mathbf{x}$  representa todas as variáveis de decisão do sistema, incluindo suas cargas, gerações, tensões, fluxos nas linhas e parâmetros dos controladores dos equipamentos FACTS, então as equações que expressam a operação em regime permanente podem ser descritas pelas restrições (5.2) e (5.3).

A região de segurança associada ao sistema é indicada por  $S$  e definida por:

$$S = \{ \mathbf{x} / \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \text{ e } \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}^{\text{lim}} \} \quad (5.13)$$

Sendo assim,  $S$  é o conjunto de todas as variáveis de decisão do sistema de potência que satisfazem todas as restrições de igualdade e desigualdade (5.2) e (5.3). Nota-se que, em sua forma mais geral,  $S$  inclui as cargas como variáveis. Isto permite definir uma das medidas de performance da rede que inclui maximizar a carga do sistema.

Portanto, o conceito de Região de Segurança é uma maneira eficiente de representar todos os pontos de operação factíveis de uma rede considerando um conjunto de limites físicos e operacionais (Galiana et al., 1996).

Deve-se observar que a inclusão de novos equipamentos no sistema tem como objetivo final aumentar a região de segurança desse sistema. A questão que se levanta é: como quantificar o aumento de  $S$ ?

Consideremos duas regiões de segurança,  $S_1$  e  $S_2$ , tais que  $S_1 \supseteq S_2$ , ou seja, a região de segurança  $S_1$  é maior que  $S_2$  e uma medida arbitrária de desempenho  $M(\mathbf{x})$ . Ao resolvermos os problemas de otimização

$$\text{Minimizar } M(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_1 \quad (5.14)$$

e

$$\text{Minimizar } M(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in S_2 \quad (5.15)$$

e encontrarmos as soluções ótimas  $\mathbf{x}_1^*$  e  $\mathbf{x}_2^*$ , temos que

$$M_1 \leq M_2 \quad (5.16)$$

sendo  $M_1 = M(\mathbf{x}_1^*)$  e  $M_2 = M(\mathbf{x}_2^*)$ .

Observa-se que um resultado análogo pode ser obtido se, em (5.14) e (5.15),  $M(\mathbf{x})$  for maximizado, ou seja, já que  $S_1 \supseteq S_2$ , então neste último caso  $M_1 \geq M_2$ .

Deve-se observar que (5.14) e (5.15) representam diferentes instâncias do problema de Fluxo de Potência Ótimo. Portanto, programas de FPO podem ser usados para analisar o aumento ou a diminuição da região de segurança de um sistema. O valor ótimo da função objetivo do problema FPO fornece uma medida escalar da região de segurança do sistema.

A consideração de restrições de segurança em ferramentas de Fluxo de Potência Ótimo pode ser feita de forma explícita, através da inclusão das equações de balanço de potência e limites para as diferentes topologias definidas pelas contingências sob análise (Stot, Alsac e Monticelli, 1987). Essa estratégia leva à definição de um problema de otimização de grande porte que pode ser resolvido empregando-se métodos de decomposição (Monticelli, Pereira e Granville, 1987). Uma forma simplificada de se considerar restrições de segurança é adotar na formulação do FPO limites que sabidamente devem ser respeitados para que o sistema resista a uma lista de contingências críticas. Essa última estratégia é empregada na operação de sistemas e é utilizada nesta dissertação (ONS, 2007).

A questão a ser analisada é quão maior é a região de segurança com os equipamentos FACTS em relação à região de segurança original do sistema. Essa análise pode ser feita através da resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo.

## 5.5 FACTS e Região de Segurança do Sistema

Seja  $S$  a região de segurança original de um sistema e  $S(F)$  a região de segurança com equipamentos FACTS. A seguinte relação é válida:

$$S(F) \supseteq S \quad (5.17)$$

Portanto, a região de segurança com FACTS inclui toda a região de segurança de operação factível sem a inclusão de equipamentos FACTS. Isso é evidente, pois qualquer vetor  $\mathbf{x}$  pertencente

à região original  $S$  também pertence a  $S(F)$ , já que qualquer equipamento FACTS, através do ajuste de seus parâmetros, pode simular o sistema original sem FACTS.

Conseqüentemente, para a maioria dos equipamentos FACTS, encontram-se pontos de operação  $x$  que pertencem a  $S(F)$  e não pertençam a  $S$ , ou seja, o conjunto de pontos de operação factíveis com FACTS contém não somente todos os pontos de operação em  $S$ , mas um maior número de pontos.

Similarmente, considerando dois equipamentos FACTS,  $F_1$  e  $F_2$ , onde  $F_1$  possui maior grau de liberdade que  $F_2$ , se esses equipamentos são colocados no mesmo local de um sistema de potência, um de cada vez, então a região de segurança tem que satisfazer:

$$S(F_1) \supseteq S(F_2) \quad (5.18)$$

Isso significa que um ponto de operação seguro atingido com o equipamento FACTS de menor grau de liberdade,  $F_2$ , pode ser alcançado pelo equipamento  $F_1$  com maior disponibilidade de controle. O inverso não é essencialmente verdadeiro.

A determinação de quão maior é  $S(F_1)$  em relação a  $S(F_2)$  pode também ser feita utilizando-se um programa de Fluxo de Potência Ótimo e adotando-se o valor ótimo da função objetivo como uma medida das regiões  $S(F_1)$  e  $S(F_2)$ .

## 5.6 Conclusões

Neste capítulo, foram derivados os índices de sensibilidade para alocação de equipamentos FACTS a partir de um modelo genérico de Fluxo de Potência Ótimo. Com esses índices é possível localizar de maneira eficiente os melhores pontos para a instalação desses equipamentos. Foi mostrado também como o potencial dos equipamentos FACTS, no desempenho dos sistemas de potência, pode ser quantificado via Fluxo de Potência Ótimo, observando o aumento da região de segurança na presença desses equipamentos através de índices de desempenho a serem maximizados ou minimizados.

No próximo capítulo, além da análise do desempenho do método primal-dual de pontos interiores na resolução do problema FPO com equipamentos FACTS, será avaliada a eficiência dos multiplicadores de Lagrange para alocação ótima desses equipamentos. Também será feito um estudo sobre a influência de equipamentos FACTS na região de segurança dos sistemas utilizando o FPO.

## CAPÍTULO VI

### 6. RESULTADOS

#### 6.1 Introdução

Neste Capítulo, é analisado, inicialmente na Seção 6.2, o desempenho do Método Primal-Dual de Pontos Interiores na resolução do problema de Fluxo de Potência Ótimo com representação do STATCOM, SSSC e UPFC. São feitas simulações com os sistemas teste do IEEE de 14 e 118 barras, um sistema equivalente de 32 barras da Região Sul do Brasil e um equivalente das regiões Sul e Sudeste. Posteriormente, na Seção 6.3, é feito um estudo sobre o uso dos multiplicadores de Lagrange como indicadores de bons locais para conexão do STATCOM e SSSC. Na Seção 6.4, é feito um estudo sobre o impacto dos equipamentos FACTS de segunda geração na operação de sistemas para aumentar a transferência de potência entre as regiões Sul e Sudeste do sistema equivalente da Região Sul de 107 barras. Os resultados estão em pu com base 100MVA. Por fim, na Seção 6.5, são feitas algumas conclusões.

#### 6.2 Desempenho do Método Primal-Dual de Pontos Interiores

Para avaliar o desempenho do método primal-dual de pontos interiores, quando os equipamentos FACTS são modelados no problema de Fluxo de Potência Ótimo, em relação ao número de iterações, foram feitas simulações com as funções objetivo de minimização de perdas (LO), desvio quadrático de tensão em relação a 1.0 pu (DT) e maximização de transferência de potência (TP). Os testes foram realizados em dois sistemas teste de pequeno e médio porte do IEEE (IEEE14 e IEEE118), um sistema equivalente de 32 barras da Região Sul do Brasil e um sistema equivalente das regiões Sul e Sudeste com 107 barras.

As simulações foram feitas com um ou dois equipamentos considerando que estivessem operando sem atingir a capacidade máxima de corrente ou atingindo o limite de corrente. Os parâmetros iniciais do método de pontos interiores são diferentes para cada situação analisada, mas sempre buscando atingir o menor número de iterações possível. Sendo assim, dependendo dos

parâmetros iniciais adotados, pode se conseguir um número de iterações maior que os resultados mostrados nas tabelas 6.1-6.3.

Para avaliar o desempenho do método quando se representa o STATCOM no FPO, o equipamento foi inserido em barras que obtiveram o menor nível de tensão durante a otimização no caso base ou de acordo com os índices de sensibilidade para alocação mostrados na Seção 5.3. O desempenho do FPO com representação do SSSC e UPFC foi analisado fixando os fluxos de potência ativa e reativa em linhas pré-especificadas. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas 6.1-6.3 para cada equipamento representado.

*Tabela 6.1 – Desempenho do FPO com STATCOM*

Caso	Base			STATCOM Livre			STATCOM com limite de $I_s$			2 STATCOM's Livres
FO	LO	DT	TP	LO	DT	TP	LO	DT	TP	TP
IEEE14	12	12	14	14	14	14	24	24	26	16
Sul 32b.	16	19	24	19	25	30	22	34	35	27
IEEE118	15	21	30	20	22	32	31	31	34	33
Sul 107b.	26	24	28	28	31	37	48	45	49	30

Os resultados obtidos com o STATCOM (Tabela 6.1) mostram que não houve alteração substancial no número de iterações com o equipamento operando livremente e com dois equipamentos no sistema. Entretanto, observa-se que, quando o limite de corrente é atingido, o número de iterações, em alguns casos, aumenta significativamente.

*Tabela 6.2 – Desempenho do FPO com SSSC*

Caso	Base			SSSC Livre			SSSC com limite de $I_{km}$			2 SSSC's Livres
FO	LO	DT	TP	LO	DT	TP	LO	DT	TP	TP
IEEE14	12	12	14	15	15	15	22	16	27	18
Sul 32b.	16	19	24	17	22	24	22	30	25	28
IEEE118	15	21	30	23	29	35	32	38	36	39
Sul 107b.	26	24	28	28	30	33	43	32	40	37

A Tabela 6.2 mostra que a inserção do SSSC livre no problema FPO aumentou pouco o número de iterações em relação ao caso base. Entretanto, a especificação de corrente máxima para o equipamento se mostrou uma restrição severa para o problema FPO com SSSC, pois é preciso haver coerência entre a corrente máxima que circula pelo equipamento e a potência ativa especificada. O desempenho do FPO com dois SSSC's foi semelhante à inserção de dois STATCOM's no sistema.

Tabela 6.3 – Desempenho do FPO com UPFC

Caso	Base			UPFC Livre			UPFC com limite de $I_s$ e $I_{km}$			2 UPFC's Livres
FO	LO	DT	TP	LO	DT	TP	LO	DT	TP	TP
IEEE14	12	12	14	15	19	20	26	23	36	*
Sul 32b.	16	19	24	25	30	29	36	40	38	34
IEEE118	15	21	30	21	29	35	27	30	47	40
Sul 107b.	26	24	28	29	30	33	35	34	45	42

\* Não foram feitas simulações para esse caso

A Tabela 6.3 mostra que, em termos gerais, o problema FPO com representação do UPFC foi o que necessitou de um maior número de iterações para ser resolvido. Isso, de fato, já era esperado, pois cada UPFC é composto por um STATCOM e um SSSC, conforme mostrado no Capítulo 4. Com os dois conversores no limite de corrente o número de iterações tende a ficar elevado para a maioria das simulações feitas, pois o fluxo de potência ativa e reativa são especificados e é necessário, assim como o SSSC, coerência entre a corrente máxima que circula pelo conversor série e os valores máximos dos fluxos.

A representação de dois UPFC's também levou a um aumento no número de iterações em relação aos outros equipamentos. Neste caso, só foi feito testes com os sistemas de maior porte e equivalente Sul de 32 barras.

Em termos gerais, o desempenho do algoritmo na presença do STATCOM e SSSC é semelhante para a maioria dos casos analisados, ou seja, poucas alterações no número de iterações para os equipamentos operando livremente, ou com dois equipamentos inseridos, e mais dificuldade para convergir quando os mesmos operam em seus respectivos limites de corrente. Comportamento semelhante foi observado em simulações feitas com outros sistemas de porte similar.

Entretanto, o algoritmo de pontos interiores se mostrou bastante sensível em relação aos valores iniciais do parâmetro barreira  $\mu$  e do fator de aceleração  $\beta$ . A Tabela 6.4 mostra as alterações no número de iterações com as variações nesses parâmetros iniciais para o caso representado na Tabela 6.1 com a inclusão do STATCOM livre no sistema Sul de 107 barras com a função objetivo DT.

Tabela 6.4 – Desempenho do FPO com STATCOM para variação de  $\mu$  e  $\beta$ .

Iterações	60	45	47	38	44	47	46	68	51	31
$\mu$	1	0.9	0.85	0.80	0.75	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
$\beta$	1	1	1	1	1	0.9	0.92	0.94	0.96	0.98

A Tabela 6.5 mostra as alterações no número de iterações com as variações nos parâmetros iniciais  $\mu$  e  $\beta$  para o caso representado na Tabela 6.2 com a inclusão do SSSC livre no sistema Sul de 107 barras com a função objetivo LO.

*Tabela 6.5 – Desempenho do FPO com SSSC para variação de  $\mu$  e  $\beta$ .*

Iterações	28	39	33	36	29	38	31	32	34	30
$\mu$	1	0.95	0.92	0.9	0.85	1	1	1	1	1
$\beta$	1	1	1	1	1	0.9	0.92	0.94	0.96	0.98

A Tabela 6.6 mostra as alterações no número de iterações com as variações nos parâmetros iniciais  $\mu$  e  $\beta$  para o caso representado na Tabela 6.3 com a inclusão do UPFC livre no sistema Sul de 107 barras com a função objetivo TP.

*Tabela 6.6 – Desempenho do FPO com UPFC para variação de  $\mu$  e  $\beta$ .*

Iterações	45	47	38	39	35	36	34	34	37	33
$\mu$	1	0.98	0.95	0.93	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
$\beta$	1	1	1	1	1	0.98	0.95	0.9	0.85	0.8

Nota-se que, para atingir um número reduzido de iterações, diversas combinações entre  $\mu$  e  $\beta$  têm que serem feitas. Comportamento semelhante foi notado em todos os casos analisados nas tabelas 6.1-6.3.

A seguir são feitas análises dos índices de sensibilidade das restrições de tensão e fluxos para encontrar a melhor localização no sistema para conexão do STATCOM e SSSC.

### 6.3 Alocação de Equipamentos FACTS via Índices de Sensibilidade

Conforme derivado na Seção 5.3, os multiplicadores de Lagrange podem ser usados para encontrar um bom local para a inserção dos equipamentos FACTS, que cause maior aumento na Região de Segurança do sistema medida pela função objetivo do problema de Fluxo de Potência Ótimo.

Nesta seção, são analisados os multiplicadores de Lagrange associados ao limite mínimo  $\underline{\pi}_{Vi}$ , e máximo de tensão,  $\bar{\pi}_{Vi}$ , na escolha do melhor ponto de inserção do STATCOM para minimizar o desvio quadrático de tensão em relação a 1.0 pu no sistema equivalente Sul de 32

barras. Posteriormente, neste mesmo sistema teste, são feitas simulações para alocação ótima do SSSC para maximizar o fluxo de potência entre duas regiões do sistema. Neste caso, são usados os multiplicadores de Lagrange referentes às restrições de fluxo de potência mínima,  $\underline{\pi}_{flj}$ , e máxima,  $\overline{\pi}_{flj}$ , nas linhas de transmissão.

Em primeiro lugar, obtêm-se pontos ótimos de operação, segundo os critérios de mínimo desvio quadrático de tensão e maximização de transferência de potência para o caso sem equipamentos FACTS. Com base nos valores dos multiplicadores de Lagrange fornecidos ao final do processo de otimização, os equipamentos são alocados e novos pontos ótimos de operação são obtidos, conforme descritos.

### 6.3.1 Índice de Sensibilidade de Limites de Tensão

O sistema equivalente Sul de 32 barras utilizado é representado na Figura 6.1.

Neste estudo, foi usado um incremento de carga igual a 23.6% acima do valor base de carregamento. Minimizando o desvio quadrático de tensão em relação a 1.0 pu no caso sem equipamentos FACTS obtêm-se os valores absolutos de  $\underline{\pi}_{Vi}$  e  $\overline{\pi}_{Vi}$  indicados na Tabela 6.7.

*Tabela 6.7 – Multiplicadores de Lagrange de Restrições de Limites de Tensão*

Barra	$\underline{\pi}_{Vi}$	$\overline{\pi}_{Vi}$
8 - Joinville 230 kV	16.32	-
12 - Gravataí 230 kV	-	0.052



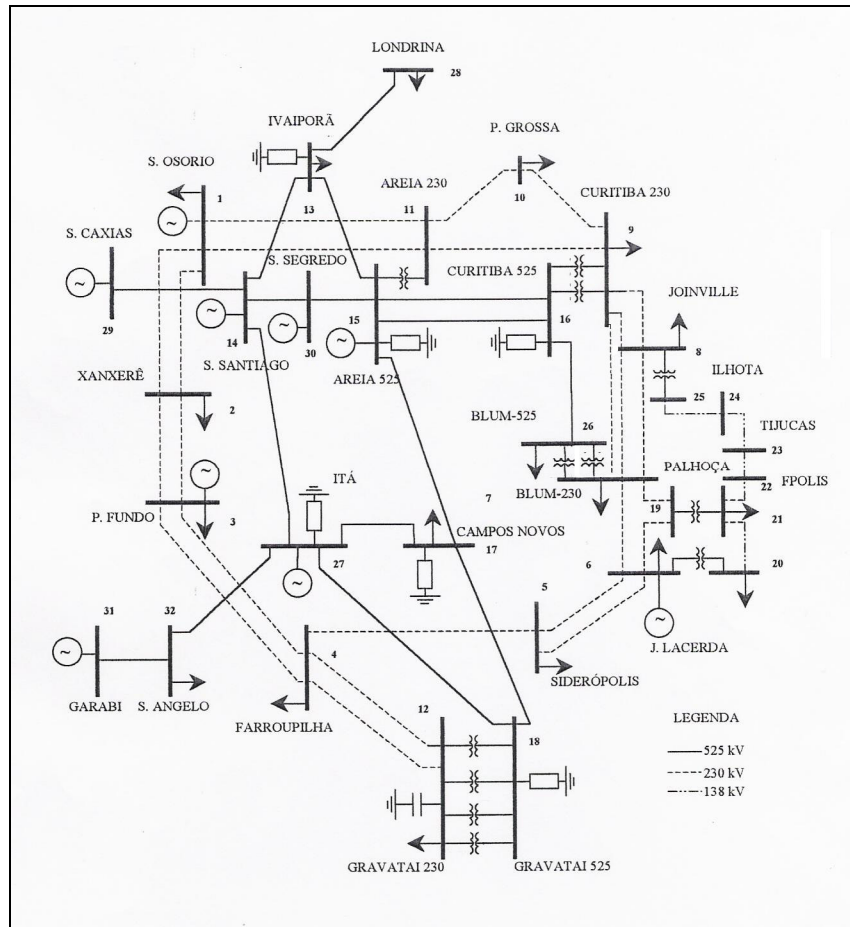


Figura 6.1 - Sistema Sul Equivalente de 32 Barras

Conforme se observa na Tabela 6.7, a barra 8 (Joinville – 230 kV) possui a maior sensibilidade em relação a função objetivo. Os outros multiplicadores de Lagrange obtidos na solução final são nulos. A diferença no perfil de tensão do sistema pode ser melhor observada na Figura 6.2, que mostra a minimização do desvio quadrático de tensão em relação a 1.0 pu para o caso base e com STATCOM na barra de Joinville 230 kV. Nota-se nessa figura um menor desvio de tensão para o sistema compensado com STATCOM.

Os dados do STATCOM utilizado neste estudo são:  $k_s = 1.23$ , limites de  $m_s$  iguais a 0 e 1,  $V_{cc} = 1$  pu, limites de  $\Psi$  iguais a  $\pm 0.8$ ,  $x_{sl} = 0.02$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 1 pu (Zhang et al., 2006; Watanabe et al., 2007). A injeção de potência reativa do STATCOM na barra 8,  $q_s$ , é igual a 0.97 pu.

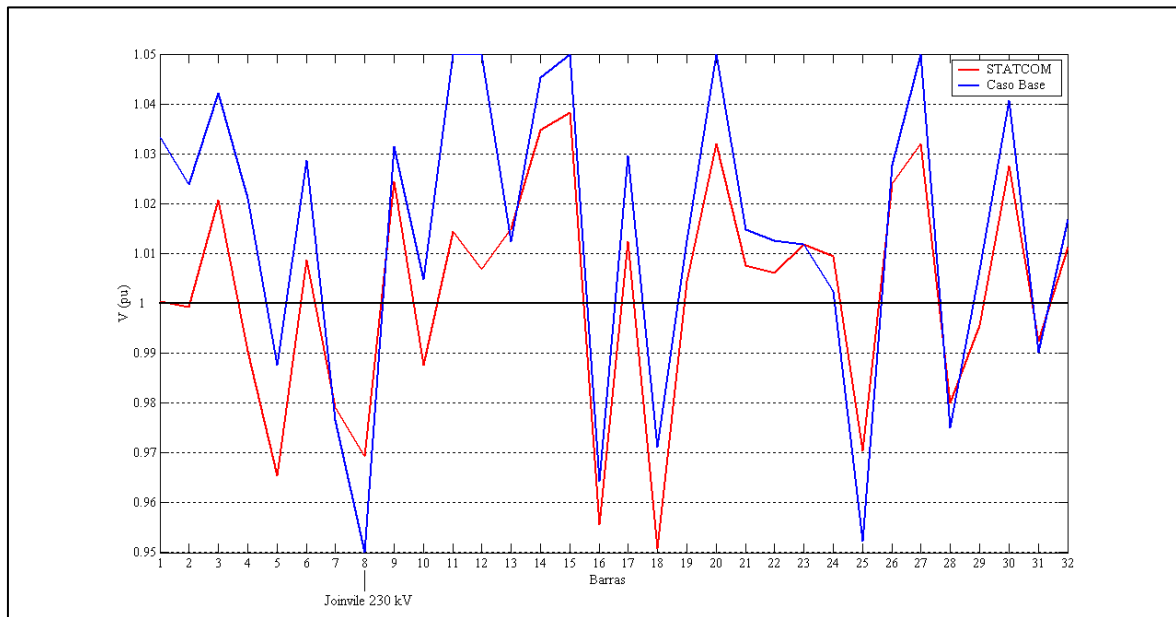


Figura 6.2 – Perfil de tensão do sistema de 32 barras base e com STATCOM

Além de proporcionar um melhor perfil de tensão ao sistema, o STATCOM na barra de Joinvile também prove outros ganhos no sistema. Enquanto para o caso base o carregamento pode ser aumentado em 23.6%, com a alocação do STATCOM na barra de Joinvile esse carregamento pode atingir 30.9% acima do carregamento base.

A seguir são apresentados estudos utilizando os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de fluxo para melhor localização do SSSC no sistema de 32 barras.

### 6.3.2 Índice de Sensibilidade de Limites de Fluxo

Para este estudo, foi utilizado o carregamento original do sistema. Inicialmente foi maximizada a transferência de potência da Região Leste do Paraná para Santa Catarina sem considerar equipamentos FACTS. Para tanto, as seguintes linhas foram introduzidas no conjunto  $\Omega$  (Apêndice A).

- Curitiba – 230kV ( 9 ) > Blumenau – 230kV ( 7 );
- Curitiba – 230kV ( 9 ) > Joinvile – 230kV ( 8 ) – Circuito 1;
- Curitiba – 230kV ( 9 ) > Joinvile – 230kV ( 8 ) – Circuito 2;
- Curitiba – 525kV ( 16 ) > Blumenau – 525kV ( 26 );

O valor máximo de intercâmbio de potência entre as regiões é igual a 8.28 pu. Nessa situação, constata-se que a linha de transmissão Curitiba 230 kV – Areia 230 kV está operando em seu limite máximo de transmissão. Sendo assim, o multiplicador de Lagrange,  $\bar{\pi}_{fl}$ , referente à linha no limite, é igual a 14 e os demais multiplicadores de Lagrange  $\bar{\pi}_{fl}$  e  $\underline{\pi}_{fl}$  são nulos. Portanto, a conexão de um SSSC em circuitos próximos a linha Curitiba 230 kV – Areia 230 kV é indicada para redirecionar o fluxo do circuito que está operando no limite.

No Caso Base (sem equipamentos FACTS), o fluxo de potência ativa no circuito Areia 230 kV – Ponta Grossa 230 kV é igual a 0.786 pu. Conectando um SSSC nesta linha com um valor de fluxo de potência ativa especificado em 2.1 pu, consegue-se reduzir o fluxo no circuito Curitiba – Areia redirecionando o fluxo de potência para a linha com SSSC. Com isso, consegue-se aumentar a transferência de potência para a Região Sul através dos circuitos indicados.

Os dados do SSSC utilizado neste estudo são:  $k_{ss} = 1.0$ , limites de  $m_{ss}$  iguais a 0 e 1,  $V_{ccs} = 1$  pu, limites de  $\Psi_s$  iguais a  $\pm 1.57$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 5 pu (Watanabe et al., 2007).

A Tabela 6.8 mostra os valores de transferência de potência obtidos para o caso base e com SSSC.

*Tabela 6.8 – Transferência de Potência Sistema Sul de 32 Barras*

Caso	Base	SSSC
		Areia 230 kV – Ponta Grossa 230 kV
Transferência de Potência (pu)	8.280	9.10

Os estudos mostrados nesta seção comprovam a eficiência dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos e máximos de tensão nas barras e fluxos nas linhas para a melhor localização do STATCOM e SSSC, respectivamente. Para o STATCOM, esse índice de sensibilidade fornece diretamente as melhores barras para inserção do equipamento. Porém, no caso de alocação do SSSC ou UPFC, o multiplicador de Lagrange serve para mostrar a região em que esses equipamentos podem atuar para aliviar possíveis congestionamentos através do redirecionamento do fluxo de potência das linhas operando no limite.

A seguir são feitos estudos do impacto dos equipamentos FACTS na operação do sistema equivalente Sul – Sudeste de 107 barras. Nos estudos, os equipamentos FACTS foram alocados ao sistema seguindo os mesmos critérios analisadas nesta seção.

## 6.4 Impacto na Operação do Sistema

### 6.4.1 Caso Base de Estudo

Para analisar o impacto dos equipamentos FACTS na operação de sistemas de potência foram feitos estudos com um sistema equivalente Sul-Sudeste de 107 barras, parcialmente representado na Figura 6.3 (Alves, 2007). O objetivo do estudo é maximizar a transferência de potência da Região Sudeste para a Região Sul pelas linhas paralelas Ibiúna – Bateias 500 kV utilizando a função objetivo de maximização de transferência de potência (TP) do problema FPO.

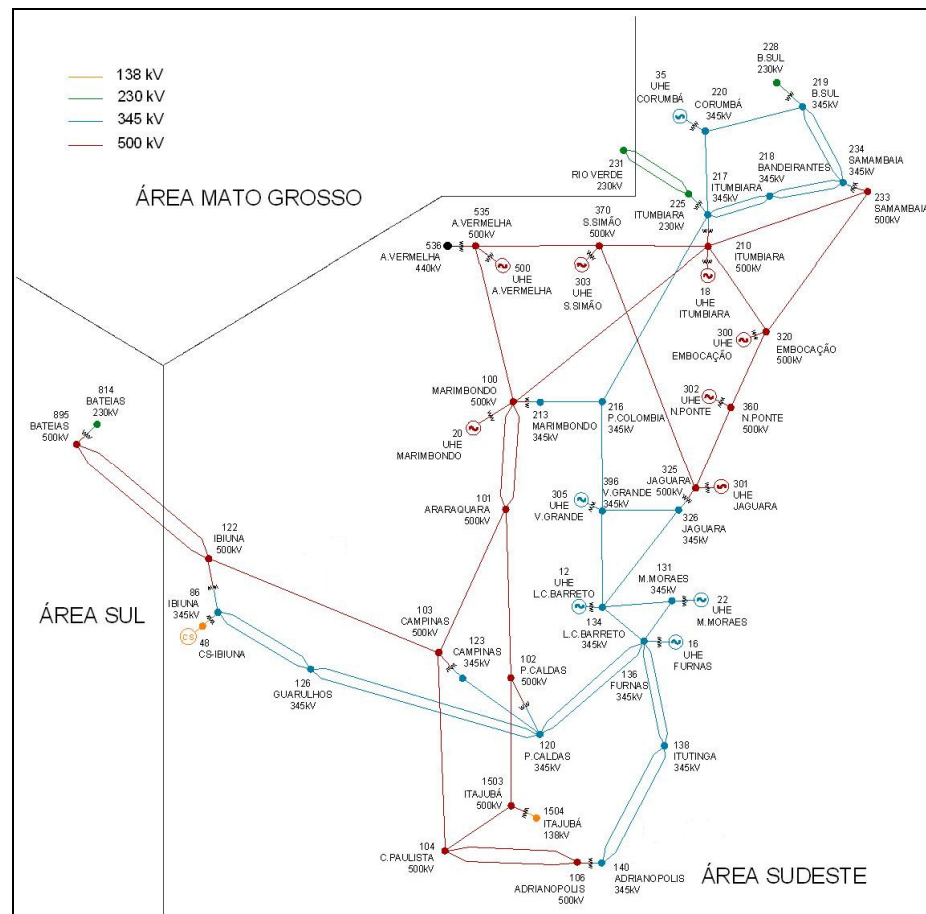


Figura 6.3 – Área Sudeste do Sistema Equivalente Sul de 107 Barras

Na condição original de operação sem FACTS (Caso Base), o valor máximo de intercâmbio atingido com a otimização foi de 7.407 pu e as tensões em varias barras e também o fluxo de potência na linha Campinas – C. Paulista 500 kV atingem os limites especificados. Os fluxos no caso base nessas principais linhas de transmissão que serão analisadas no estudo estão na Tabela 6.9.

*Tabela 6.9 – Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base*

<b>Linha</b>	<b>Fluxo de potência ativa (pu)</b>
Ibiúna - Bateias 500 kV - C1	3.704
Ibiúna - Bateias 500 kV - C2	3.704
Campinas - C. Paulista 500 kV	3.15

Todos os controles presentes no sistema foram utilizados no processo de otimização. Tensões de barra foram limitadas entre 0.95 e 1.05 pu e todos os limites físicos e operacionais de linhas e equipamentos foram considerados. A seguir são mostrados os ganhos de intercâmbio com cada equipamento FACTS modelado neste trabalho.

#### 6.4.2 STATCOM

A escolha do local de inserção do STATCOM foi feita com base nos valores absolutos dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos e máximos de tensão. A metodologia foi usada devido à eficiência desses indicadores, já discutida e comprovada na Seção 6.3.

A Tabela 6.10 mostra os multiplicadores de Lagrange de limite de tensão com maiores valores absolutos no Caso Base.

*Tabela 6.10 – Multiplicadores de Lagrange de Tensões*

<b>Barra</b>	$\underline{\pi}_{Vi}$	$\overline{\pi}_{Vi}$
140 - Adrianópolis 345 kV	520.1	–
122 - Ibiúna 500 kV	–	431.05
100 - Marimbondo 500 kV	–	362.98
325 - Jaguará 500 kV	–	63.60
396 - Vila Grande 345 kV	–	51.79

Observa-se que os multiplicadores de Lagrange indicam, para a alocação do STATCOM, uma barra próxima à interligação Sul-Sudeste (Ibiúna 500 kV) e também barras distantes da interligação Sul-Sudeste. Testes realizados com a introdução do STATCOM nas barras mostradas na Tabela 6.10 resultaram em pouca influência na maximização do intercâmbio entre as regiões, com exceção da barra 140 que possui o maior valor absoluto de multiplicador de Lagrange.

Com a alocação do STATCOM na barra 140 (Adrianópolis 345 kV) obteve-se um aumento de 244.5 MW no ganho de intercâmbio entre as regiões Sul-Sudeste, o que corresponde a um ganho de 33%. A Tabela 6.11 mostra as alterações nos fluxos de potência que levaram a esse aumento. Observa-se que o fluxo de potência ativa na linha de transmissão Campinas – C. Paulista 500 kV foi reduzido e conseqüentemente, a linha deixou de ser operada no seu limite de transmissão. Por outro lado, os fluxos nos circuitos paralelos Ibiúna – Bateias 500 kV aumentaram de forma significativa, aumentando o recebimento de energia do Sul proveniente da Região Sudeste.

Uma análise detalhada do caso mostra que, com a inserção do STATCOM em Adrianópolis, maior quantidade de potência pôde ser transmitida pelas linhas de 345 kV, aliviando os circuitos de 500 kV que levam energia até a parte inferior da Região Sudeste, possibilitando o aumento na transferência de potência para a Região Sul.

Os dados do STATCOM utilizado neste estudo são:  $k_s = 1.23$ , limites de  $m_s$  iguais a 0 e 1,  $V_{cc} = 1$  pu, limites de  $\Psi$  iguais a  $\pm 0.8$ ,  $x_{sl} = 0.02$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 1 pu (Zhang et al., 2006; Watanabe et al., 2007).

*Tabela 6.11 – Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com STATCOM*

Linha	Fluxo de potência ativa (pu)	
	Caso Base	STATCOM
Ibiúna – Bateias 500 kV – C1	3.704	4.926
Ibiúna – Bateias 500 kV – C2	3.704	4.926
Campinas – C. Paulista 500 kV	3.15	2.92

A Tabela 6.12 indica a barra do STATCOM, os valores ótimos de suas variáveis de controle  $m_s$ ,  $\Psi$ ,  $\delta_{140}$  e  $V^{esp}$ , as perdas no equipamento e sua injeção de potência reativa,  $q_s$ .

*Tabela 6.12 – Variáveis e Injeções do STATCOM no Ponto Ótimo*

Barra	$q_s$ (pu)	$m_s$	$\Psi$ (rad)	$\delta_{140}$ (rad)	$P_{cc}$ (pu)	$V^{esp}$ (pu)
140	0.9693	0.7483	-0.6683	-0.6679	0.014	0.95

Como as perdas do equipamento são pequenas, o ângulo de defasagem entre os terminais do conversor em derivação e a barra 140 é pequeno. Vale notar que o ganho com o STATCOM poderia ser superior caso um maior limite de corrente fosse especificado para o equipamento.

Este é um caso em que, sem ter acesso aos multiplicadores de Lagrange de limites de tensão, se tentaria de maneira iterativa alocar o STATCOM em diversas barras do sistema até se descobrir

a barra ótima para alocação. Nota-se que, intuitivamente, seriam feitos testes com a alocação do equipamento em barras próximas a interligação Sul-Sudeste, o que leva a resultados piores do que os obtidos com a alocação do equipamento em Adrianópolis.

A seguir, é analisado o impacto do SSSC no intercâmbio entre as regiões Sul-Sudeste para o mesmo caso base original dos estudos feitos nesta seção.

### 6.4.3 SSSC

A escolha do local de inserção do SSSC foi feita com base em simulações com o equipamento inserido nas linhas Campinas – Ibiúna 500 kV e Campinas – P. Caldas 345 kV, próximas a linha com limitação de fluxo. Buscou-se, assim, criar caminhos alternativos para os fluxos nas linhas próximas à interconexão e aliviar o fluxo de potência na linha Campinas – C. Paulista 500 kV, que se encontra no limite no caso base.

As simulações mostram que a linha Campinas – Ibiúna 500 kV é a melhor opção para a conexão do SSSC, pois redireciona o fluxo para os circuitos paralelos que interligam as regiões Sul e Sudeste. No Caso Base, os fluxos de potência ativa e reativa no circuito Campinas – Ibiúna são iguais a 7.001 pu e -1.7123 pu, respectivamente. Operando com o SSSC no modo de controle de potência ativa, Equação (3.17), especificou-se um fluxo de potência ativa igual a 8.5 pu para circular no equipamento.

Os dados do SSSC utilizado neste estudo são:  $k_{ss} = 1.0$ , limites de  $m_{ss}$  iguais a 0 e 1,  $V_{ccs} = 1$  pu, limites de  $\Psi_s$  iguais a  $\pm 1.57$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 10 pu (Watanabe et al., 2007).

Com a alocação do SSSC na linha Campinas – Ibiúna e a especificação de fluxo de potência ativa mencionada, obteve-se um ganho de 16.8% na transferência de potência, o equivalente a 124.8 MW. Esse ganho foi consequência da modificação do fluxo de potência ativa nas linhas de interconexão e em linhas próximas, tal como mostrado na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com SSSC

Linha	Fluxo de potência ativa (pu)	
	Caso Base	SSSC
Ibiúna – Bateias 500 kV – C1	3.704	4.328
Ibiúna – Bateias 500 kV – C2	3.704	4.328
Campinas – C. Paulista 500 kV	3.15	2.99
Campinas – Ibiúna 500 kV	7.001	8.5

O fluxo de potência reativa na linha com SSSC se alterou de -1.7123 pu para -2.81 pu, ou seja, maior suporte de potência reativa foi necessário para manter as tensões nas barras próximas à barra de Campinas 500 kV.

A inclusão do SSSC permitiu um aumento no fluxo das linhas paralelas que interligam o Sul ao Sudeste e, assim como ocorrido com o STATCOM, reduziu o fluxo de potência ativa no circuito que estava operando no limite.

A Tabela 6.14 indica a linha do SSSC, os valores ótimos de suas variáveis de controle  $m_{ss}$ ,  $\Psi_s$ , as perdas no equipamento e a potência ativa especificada  $P_{km}^{esp}$ .

Tabela 6.14 – Variáveis e Injeções do SSSC no Ponto Ótimo

Linha	$m_{ss}$	$\Psi_s$ (rad)	$P_{ccs}$ (pu)	$P_{km}^{esp}$ (pu)
Campinas-Ibiúna 500kV	0.0693	1.27	0.014	8.5

As perdas internas no equipamento,  $P_{ccs}$ , são iguais as perdas no STATCOM, pois os parâmetros do VSC são os mesmos para os dois equipamentos. De forma semelhante ao que ocorre com o STATCOM, o ganho com o SSSC poderia ser superior caso um maior  $P_{km}^{esp}$  fosse especificado para o equipamento redirecionar mais fluxo de potência para as linhas paralelas Ibiúna – Bateias 500 kV. No entanto, simulações feitas com maiores valores de  $P_{km}^{esp}$  mostraram que, além de ser necessário um equipamento com maior capacidade de corrente, na solução, a abertura angular do conversor série,  $\Psi_s$ , tende a ficar muito elevada quando comparada com valores típicos descritos na literatura (Zhang, 2003).

A seguir é analisado o impacto do UPFC inserido no mesmo local dos estudos feitos para análise do potencial do SSSC, a fim de comparar tais equipamentos.



#### 6.4.4 UPFC

A utilização do SSSC na linha Campinas – Ibiúna 500 kV permite somente o controle de uma grandeza por vez, tal como mostram as equações (3.17)-(3.20). A utilização do UPFC com o mesmo objetivo de aumentar o intercâmbio Sudeste-Sul, direcionando o fluxo por essa linha, permite o controle simultâneo dos fluxos de potência ativa e reativa levando a um maior ganho na transferência de potência, tal como mostrado a seguir.

No sistema com SSSC, os fluxos de potência ativa e reativa que circulavam pela linha Campinas – Ibiúna e pelo equipamento eram de 8.5 pu e -2.81 pu, respectivamente. Com o objetivo de diminuir o fluxo de potência reativa nessa linha e aumentar o recebimento de energia na Região Sul, o SSSC foi substituído pelo UPFC. Com o equipamento na rede, foi especificado um fluxo de potência ativa de 8.5 pu e de potência reativa de -2.25 pu na linha.

O conversor em derivação do UPFC utilizado neste estudo possui as seguintes características:  $k_s = 1.23$ , limites de  $m_s$  iguais a 0 e 1,  $V_{cc} = 1$  pu, limites de  $\Psi$  iguais a  $\pm 0.8$ ,  $x_{sl} = 0.02$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 1 pu. Para o conversor em série as seguintes características do equipamento foram adotadas:  $k_{ss} = 1.0$ , limites de  $m_{ss}$  iguais a 0 e 1,  $V_{ccs} = 1$  pu, limites de  $\Psi_s$  iguais a  $\pm 1.57$  e capacidade de corrente do equipamento igual a 10 pu (Zhang et al., 2006; Watanabe et al., 2007).

Com a alocação do UPFC e a especificação de potência ativa e reativa mencionadas obteve-se um ganho de 20.1% no recebimento de energia do Sul proveniente da Região Sudeste, o que equivale a 148.6 MW. Os principais fluxos que sofreram impacto com a alocação do equipamento são mostrados na Tabela 6.15.

*Tabela 6.15 – Fluxos nas Linhas de Estudo – Caso Base e com UPFC*

Linha	Fluxo de potência ativa (pu)	
	Caso Base	UPFC
Ibiúna – Bateias 500 kV – C1	3.704	4.447
Ibiúna – Bateias 500 kV – C2	3.704	4.447
Campinas – C. Paulista 500 kV	3.15	3.14
Campinas – Ibiúna 500 kV	7.001	8.5

A inclusão do UPFC permitiu um aumento no fluxo das linhas paralelas que interligam o Sul ao Sudeste, porém a linha Campinas – C. Paulista 500 kV opera quase no limite máximo de fluxo (3.15 pu).

Como o UPFC possui um conversor em derivação, parte da potência reativa necessária na região de Campinas 500 kV foi fornecida pelo equipamento, em vez de circular pela linha Campinas – Ibiúna 500 kV. Portanto, devido à redução do fluxo de potência reativa nessa linha, obteve-se um ganho de 3.3% a mais no recebimento de energia com o UPFC em relação ao obtido com o SSSC com o mesmo valor de  $P_{km}^{esp}$ .

A Tabela 6.16 indica a linha do conversor série do UPFC, os valores ótimos de suas variáveis de controle  $m_{ss}$ ,  $\Psi_s$ , as perdas no equipamento e a potência ativa e reativa especificada. A Tabela 6.17 indica a barra do conversor em derivação, os valores ótimos de suas variáveis de controle  $m_s$ ,  $\Psi$ ,  $\delta_{103}$  e  $V^{esp}$ , as perdas no equipamento e a injeção de potência reativa,  $q_s$ .

*Tabela 6.16 – Variáveis e Injeções do Conversor em Série no Ponto Ótimo*

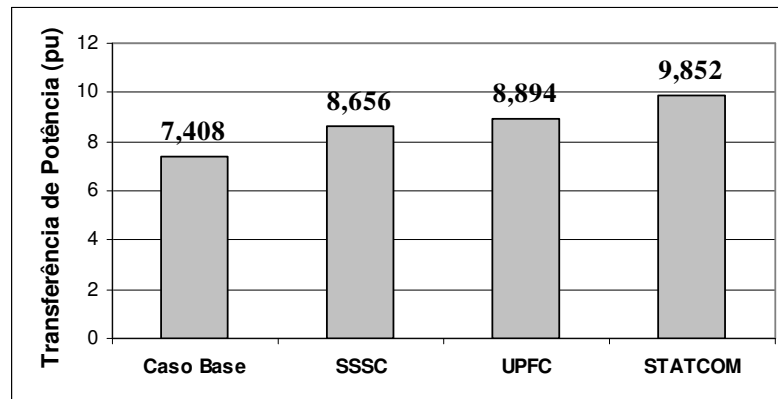
Linha	$m_{ss}$	$\Psi_s$ (rad)	$P_{ccs}$ (pu)	$P_{km}^{esp}$ (pu)	$Q_{km}^{esp}$ (pu)
Campinas-Ibiúna 500kV	0.0409	1.262	0.014	8.5	-2.25

*Tabela 6.17 – Variáveis e Injeções do Conversor em Derivação no Ponto Ótimo*

Barra	$q_s$ (pu)	$m_s$	$\Psi$ (rad)	$\delta_{103}$ (rad)	$P_{cc}$ (pu)	$V^{esp}$ (pu)
103	0.8817	0.7874	-0.5279	-0.5276	0.014	1.003

As perdas internas dos conversores em derivação e série são iguais, satisfazendo a Equação (4.35) de balanço de potência interna dos equipamentos. As simulações mostram que alterações em  $P_{km}^{esp}$ ,  $Q_{km}^{esp}$  e capacidade de corrente dos conversores podem levar a maiores ganhos de intercâmbio, mas a abertura angular do conversor série tende a ficar elevada, assim como o ocorrido com o SSSC.

A Figura 6.4 compara os ganhos obtidos no intercâmbio de potência entre as regiões Sul e Sudeste para os três equipamentos estudados nesta seção.



*Figura 6.4 – Comparação de transferência de potência*

Como foi descrito anteriormente, esses ganhos obtidos podem variar de acordo com a capacidade de corrente de cada equipamento e abertura angular dos conversores em série.

O aumento da função objetivo TP com equipamentos FACTS, em relação ao caso base, comprova que a região de segurança do sistema aumentou em relação ao caso original. Com isso, um maior número de pontos de operação factíveis pôde ser alcançado, obtendo-se um melhor desempenho do sistema sem a necessidade de construção de novos circuitos.

Por fim, deve-se notar que, apesar do UPFC ser o equipamento com maior número de controles, sua inserção levou à definição de uma região de segurança para o sistema que é menor do que a definida pela inserção do STATCOM. A explicação para este comportamento está no fato que os dois equipamentos foram inseridos em locais diferentes da rede.

## 6.5 Conclusões

Neste Capítulo, foi analisado o desempenho do método primal-dual de pontos interiores no problema de Fluxo de Potência Ótimo com representação de equipamentos FACTS. As simulações feitas mostraram que o FPO com a representação do STATCOM, ou SSSC, operando sem atingirem seus respectivos limites de corrente, não levou a alterações significativas no número de iterações para a convergência do algoritmo. Desempenho um pouco diferente foi obtido com o UPFC, que necessitou de um maior número de iterações para convergência do processo. Os três equipamentos modelados, quando simulados operando no limite de suas respectivas capacidades de corrente, precisaram de um número elevado de iterações para obter a solução ótima.

Os índices de sensibilidade derivados na Seção 5.3 se mostraram eficientes como indicadores dos melhores pontos para instalação dos equipamentos, que levam aos melhores resultados considerando determinado índice de desempenho.

O aumento na região de segurança do sistema de 107 barras, proporcionado pela utilização dos equipamentos FACTS, foi comprovado quantitativamente pela função objetivo de maximização de transferência de potência. Com isso, um maior fluxo de potência pôde ser transferido em determinadas linhas de transmissão.

## CAPÍTULO VII

### 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação teve como objetivo principal modelar os equipamentos FACTS de segunda geração no problema FPO. Com esta modelagem, foi possível avaliar o impacto destes equipamentos na operação de sistemas de potência.

O FPO mostrou ser uma ferramenta útil para verificar o potencial dos equipamentos FACTS para melhorar a condição operativa dos sistemas. Com o FPO, se pôde mensurar quantitativamente o aumento na região de segurança dos sistemas através de índices de desempenho usualmente empregados na operação.

Com o aumento na região de segurança do sistema na presença de equipamentos FACTS, novos pontos de operação, que na ausência desses equipamentos eram ineficazes, puderam ser alcançados. Obtida uma maior região de segurança, foram possíveis maiores níveis de carregamento, transferência de potência em linhas de transmissão e melhor perfil de tensão, conforme mostrado no Capítulo VI.

Os índices de sensibilidade obtidos na resolução derivados do problema FPO se mostraram eficientes como indicadores de bons locais para a inserção de equipamentos FACTS no sistema. Esses indicadores evitam que se tenha que fazer várias simulações extras para a escolha do local de conexão dos equipamentos.

Apesar de não serem feitas simulações em regime dinâmico, as curvas ( $P \times \delta$ ) mostradas nas figuras 2.7 e 3.7 indicam um aumento na margem de estabilidade transitória com equipamentos FACTS. O trabalho se concentrou nos estudos em regime permanente, mas é importante salientar que os estudos dinâmicos devem ser feitos no ponto ótimo para analisar se a solução ótima encontrada é viável também em regime dinâmico. Entretanto, os modelos propostos neste trabalho podem ser representados em programas computacionais para a determinação do ponto de operação pré-contingência.

Como foi visto no Capítulo I, o uso de equipamentos FACTS de segunda geração, em comparação aos equipamentos de primeira geração, ainda é pequeno. Entretanto, as vantagens que os equipamentos FACTS de segunda geração possuem em relação aos seus antecessores sugerem que, futuramente, o seu uso venha a aumentar. Estudos paralelos a esta dissertação, feitos em parceria com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) descritos nos trabalhos de (Almeida e Silveira, 2006) e (Almeida et al., 2007) já analisam o impacto do STATCOM no Sistema Interligado Nacional (SIN) para aumentar o recebimento de energia da Região Nordeste provinda de outras regiões do SIN. No entanto, os desempenhos do SSSC e do UPFC não foram analisados pois esses equipamentos não estão modelados em ferramentas disponíveis para o ONS. Sendo assim, é necessário que esses novos equipamentos sejam representados nas ferramentas computacionais de análise de sistemas elétricos de potência para uma melhor avaliação de suas potencialidades.

Os estudos e modelagens apresentados nesta dissertação podem ser utilizados como base para a modelagem de outros equipamentos FACTS e a realização de novas pesquisas com esses equipamentos. Entre os tópicos de pesquisa que merecem um maior aprofundamento e investigação, podem-se sugerir os seguintes:

- A modelagem de outros equipamentos FACTS de segunda geração, tais como o IPFC, CSC e GUPFC, no problema de FPO, para analisar o impacto na operação de sistemas de potência;
- Generalizar a modelagem do SSSC para analisar as outras equações de controle que o equipamento disponibiliza, tais como o controle da reatância série de linhas, potência reativa e tensão;
- Fazer um estudo sobre o impacto dos equipamentos FACTS de segunda geração no mercado de energia elétrica;
- Analisar o impacto desses equipamentos na solução de problemas de natureza dinâmica;
- Realizar estudos de alocação ótima de equipamentos FACTS via algoritmos genéticos;
- Fazer uma formulação mais genérica para a função objetivo de maximização de transferência;
- O programa desenvolvido apresenta bastante sensibilidade com relação à inicialização dos parâmetros barreira  $\mu$  e o fator de aceleração  $\beta$  com a representação dos equipamentos FACTS. Portanto, há necessidade de melhorias no método de inicialização do programa proposto;

- Devido aos ângulos da tensão dos conversores dos equipamentos FACTS estarem modelados em relação à barra de referência, a escolha desta barra pode interferir na convergência do programa e fazer com que estes ângulos atinjam o limite máximo, ou mínimo, especificado. Portanto, é necessário fazer uma modelagem que represente estes ângulos em relação à barra ao qual estão conectados.

# APÊNDICE A

## A.1 Formulação do Problema FPO com Equipamentos FACTS

A formulação a seguir representa o modelo genérico do problema de Fluxo de Potência Ótimo com a representação do UPFC. Devido a esse equipamento ser composto pela união da modelagem do STATCOM e SSSC, com algumas alterações no conjunto de expressões a seguir, consegue-se representar os outros dois equipamentos.

As equações de balanço de potência no sistema são expressas por (4.53) e (4.54). A inserção do equipamento exige também a introdução das suas equações de controle e de seus limites no problema FPO.

Considerando todas as modificações, o problema é escrito:

$$\min \mathbf{F} \quad (\text{A.1})$$

sujeito a

$$\mathbf{pg} - \mathbf{pd} - \mathbf{p}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{ps}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{p}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) = \mathbf{0} \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{qg} - \mathbf{qd} - \mathbf{q}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{qs}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{q}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) + \text{diag}(\mathbf{V}_i^2) \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{qg}^{\min} \leq \mathbf{qg} \leq \mathbf{qg}^{\max} \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{p}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{p}^{esp} = \mathbf{0} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{q}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{q}^{esp} = \mathbf{0} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}^{esp} + \mathbf{x}'_{sl} \mathbf{Q}_s \quad (\text{A.7})$$

$$\mathbf{pcas}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s) - \mathbf{pccs} = \mathbf{0} \quad (\text{A.8})$$

$$\mathbf{pca}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi) - \mathbf{pcc} = \mathbf{0} \quad (\text{A.9})$$

$$\mathbf{pcc} - \mathbf{pccs} = \mathbf{0} \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{V}^{\min} \leq \mathbf{V}^{esp} \leq \mathbf{V}^{\max} \quad (\text{A.11})$$



$$|\dot{\mathbf{I}}_{serie}| \leq I_{serie}^{max} \quad (A.12)$$

$$|\dot{\mathbf{I}}_{deriv}| \leq I_{deriv}^{max} \quad (A.13)$$

$$\mathbf{m}_s^{min} \leq \mathbf{m}_s \leq \mathbf{m}_s^{max} \quad (A.14)$$

$$\psi^{min} \leq \psi \leq \psi^{max} \quad (A.15)$$

$$\mathbf{m}_{ss}^{min} \leq \mathbf{m}_{ss} \leq \mathbf{m}_{ss}^{max} \quad (A.16)$$

$$\psi_s^{min} \leq \psi_s \leq \psi_s^{max} \quad (A.17)$$

$$\mathbf{fl}^{min} \leq \mathbf{fl}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a}) \leq \mathbf{fl}^{max} \quad (A.18)$$

$$\mathbf{V}^{min} \leq \mathbf{V} \leq \mathbf{V}^{max} \quad (A.19)$$

$$\mathbf{b}^{min} \leq \mathbf{b} \leq \mathbf{b}^{max} \quad (A.20)$$

$$\mathbf{pg}^{min} \leq \mathbf{pg} \leq \mathbf{pg}^{max} \quad (A.21)$$

$$\mathbf{a}^{min} \leq \mathbf{a} \leq \mathbf{a}^{max} \quad (A.22)$$

Para expressar o problema FPO somente com o STATCOM, trabalha-se com o conjunto de equações (A.2)-(A.4) sem as expressões de  $\mathbf{p}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi)$  e  $\mathbf{q}_{UPFC}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_{ss}, \psi_s, \mathbf{m}_s, \psi)$ . As expressões dos fluxos de potência ativa e reativa,  $\mathbf{p}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a})$  e  $\mathbf{q}'(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a})$ , são modificadas para  $\mathbf{p}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a})$  e  $\mathbf{q}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{a})$ , pois nesse caso, a matriz de admitância de barras original do sistema,  $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$ , não precisa das modificações necessárias para a representação do SSSC e UPFC. Além dessas equações, o modelo do STATCOM utiliza as equações (A.7), (A.9), (A.11), (A.13)-(A.15) e o conjunto de equações originais do FPO sem equipamentos FACTS (A.18)-(A.22).

Para expressar o problema FPO somente com o SSSC, o índice *UPFC* é substituído por *SSSC* e trabalha-se com o conjunto de equações (A.2)-(A.4) sem as expressões de  $\mathbf{ps}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi)$  e  $\mathbf{qs}(\mathbf{V}, \delta, \mathbf{m}_s, \psi)$ . Além dessas equações, o modelo do SSSC utiliza as equações (A.5), (A.8), (A.12), (A.16)-(A.17) e o conjunto de equações originais do FPO sem equipamentos FACTS (A.18)-(A.22). Sendo as variáveis presentes no problema definidas na Lista de Símbolos ou em cada capítulo que representa os respectivos equipamentos.

## A.2 Função Objetivo de Maximização de Transferência de Potência

A função objetivo de maximização de transferência de potência (TP) é expressa numericamente por:

$$\max \sum_{i \in \Omega} fl_i(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (\text{A.23})$$

sendo

$\Omega$  o conjunto de linhas que terão os fluxos maximizados;

$fl_i$  o fluxo de potência ativa na linha  $i$ .

Em termos matriciais a Equação (A.23) pode ser definida por:

$$\max \mathbf{e}^T \mathbf{fl}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\delta}, \mathbf{a}) \quad (\text{A.24})$$

sendo o vetor  $\mathbf{e}$ , de dimensão  $(nl \times 1)$ , expresso por

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} i \in \Omega \quad (\text{A.25})$$

Esta formulação somente é válida para fluxos que tenham valores positivos, sendo que em caso de valores de fluxos negativos é necessária a inversão das barras de origem e destino das linhas de transmissão que terão seus fluxos maximizados para que esses valores se tornem positivos.

## APÊNDICE B – RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Uma vez que o grau de complexidade do problema FPO não se altera muito com a representação dos equipamentos FACTS, emprega-se para resolver o problema descrito um método de otimização que tem se mostrado bastante eficiente em diferentes formulações do FPO: o método Primal-Dual de Pontos Interiores (Fang e Puthempura, 1993). A implementação computacional foi feita em MATLAB, adotando-se programação orientada a matrizes associada às técnicas de esparsidade disponíveis no aplicativo.

O método primal-dual de pontos interiores trabalha com uma formulação modificada do problema FPO. As restrições de desigualdade (1.20) são transformadas em restrições de igualdade através da inclusão de variáveis de folga conforme o exposto a seguir.

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s} = \mathbf{0}, \mathbf{s} > \mathbf{0} \quad (\text{B.1})$$

sendo  $\mathbf{s}$  o vetor das variáveis de folga adicionadas.

Logo após, adiciona-se uma função barreira logarítmica à função objetivo (1.18) que garante a não negatividade das variáveis de folga que se torna:

$$f(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln(s_i) \quad (\text{B.2})$$

onde  $\mu$  é o parâmetro barreira.

O problema de otimização a ser resolvido passa a ser:

$$\text{Minimizar } F(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln(s_i) \quad (\text{B.3})$$

$$\text{sujeito a } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (\text{B.4})$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s} = \mathbf{0}, \mathbf{s} > \mathbf{0} \quad (\text{B.5})$$

A função Lagrangeana do problema é:

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\pi}) = f(\mathbf{x}) - \mu \sum_i \ln(s_i) + \boldsymbol{\pi}^T [\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s}] + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (\text{B.6})$$

As condições necessárias de otimalidade do problema (B.3) – (B.5) são:

$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial^T \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\pi} + \frac{\partial^T \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (\text{B.7})$$

$$-\mu \mathbf{S}^{-1} - \boldsymbol{\pi} = \mathbf{0} \Rightarrow -\mu \mathbf{e} - \mathbf{S}^T \boldsymbol{\pi} \quad (\text{B.8})$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (\text{B.9})$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{s} = \mathbf{0} \quad (\text{B.10})$$

$$\mathbf{S} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\pi} \geq \mathbf{0} \quad (\text{B.11})$$

sendo  $\mathbf{S}$  uma matriz diagonal formada pelas variáveis de folga,  $\boldsymbol{\pi}$  e  $\boldsymbol{\lambda}$  os vetores de multiplicadores de Lagrange e  $\mathbf{e}$  um vetor unitário.

O método primal-dual de pontos interiores resolve o sistema não linear (B.7) – (B.11) de forma iterativa, reduzindo o valor de  $\mu$  após cada iteração. Representando as equações (B.7) – (B.10) por:

$$\boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}) = \mathbf{0} \quad (\text{B.12})$$

sendo  $\mathbf{z} = [\mathbf{x}^T, \mathbf{s}^T, \boldsymbol{\lambda}^T, \boldsymbol{\pi}^T]^T$ , e tomando uma estimativa inicial de solução,  $\mathbf{z}^o$  para o qual  $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}^o) = \mathbf{0}$ , pode se obter o vetor de incremento em  $\mathbf{z}$  através de uma aproximação linear de (B.12)

$$\boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}) = \boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}^o) + \frac{\partial \boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}^o)}{\partial \mathbf{z}} \Delta \mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (\text{B.13})$$

o que fornece

$$\Delta \mathbf{z} = - \left[ \frac{\partial \boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}^o)}{\partial \mathbf{z}} \right]^{-1} \cdot \boldsymbol{\rho}(\mathbf{z}^o) \quad (\text{B.14})$$

O vetor  $\Delta \mathbf{z} = [\Delta \mathbf{x}^T, \Delta \mathbf{s}^T, \Delta \boldsymbol{\lambda}^T, \Delta \boldsymbol{\pi}^T]^T$  é usado para atualizar as variáveis:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^o + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (\text{B.15})$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}^o + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta \mathbf{s}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\lambda}^o + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \boldsymbol{\lambda}$$

$$\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi}^o + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \boldsymbol{\pi}$$

sendo  $\alpha_p$  e  $\alpha_d$  passos de atualização calculados de forma que não sejam violados os limites em (B.11) e  $\sigma = 0.9995$ , usado para que a próxima estimativa de solução esteja no interior do conjunto viável do problema (Fang e Puthempura, 1993).

Após a atualização das variáveis, o parâmetro barreira é atualizado de acordo com a expressão

$$\mu = \frac{\mathbf{s}^T \cdot \boldsymbol{\pi}}{2 \cdot n \cdot \beta} \quad (\text{B.16})$$

sendo  $n$  o número de restrições e  $\beta$  uma constante definida pelo usuário.

O processo se repete até que se tenha  $\rho(\mathbf{z}) \approx 0$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, K. C.; SILVEIRA, A. S.; 2006. *Relatório 1: Levantamento do Uso de Equipamentos FACTS*. Projeto ONS-UFSC GAT-CT-177/06: Aplicação de Dispositivos FACTS para Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN.
- ALMEIDA, K. C. et al.; 2007. *Relatório 3: Representação de FACTS Ainda Não Presentes no SIN: STATCOM, SSSC e UPFC*. Projeto ONS-UFSC GAT-CT-177/06: Aplicação de Dispositivos FACTS para Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN.
- ALVES, W. F.; 2007. *Proposição de Sistemas-Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência*. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal Fluminense.
- BALIGA, B. J.; 1995. Power ICs in the Saddle. *IEEE Spectrum*. Julho, p. 34-40.
- BARBI, I.; 2000. *Eletrônica de Potência*. 3a. edição, Edição do autor, Florianópolis.
- BAZARAA, M. S.; SHETTY, C. M.; 1979. *Nonlinear Programming – Theory and Algorithms*. 1a. ed. School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA: John Wiley & Sons, 1979. ISBN 0-471-78610-1.
- BIAN, J.; RAMEY, D. G.; NELSON, R. J.; 1997. A Study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller. *IEEE Transactions on Power delivery*, v. 12, n. 3, p. (Jul.) 1385-1391.
- CARPENTIER, J. L.; 1962. Contribution à l'Étude du Dispatching Économique. *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, v.3, n.8, p. 431-447.
- CARPENTIER, J. L.; 1985. Optimal Power Flows: Uses, Methods and Developments. *Symposium Planning & Operation*, p. 11-21 Rio de Janeiro - RJ.
- CARPENTIER, J. L.; 1987. Towards a Secure and Optimal Automatic of power Systems. *Proceedings of the power Systems Computer Application Conference*, Montreal, Canadá, p. 2-37.

- CHEN, H.; WANG, Y; ZHOU, R.; 2000. Analysis of Voltage Stability Enhancement via Unified Power Flow Controller. In *International Conference on Power System Technology, PowerCon2000*, v.1, p. 403-408.
- DUPIN, D. S.; ALMEIDA, K. C.; 2008. Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Fluxo de Potência Ótimo. *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*, v.1, p. 1-6 Juiz de Fora - MG.
- FANG, S. C.; PUTHEMPURA, S.; 1993. *Linear Optimization and Extensions*. Prentice-Hall.
- GAMA, C.; SILVEIRA, A. S.; 1994. Compensação série avançada: mais capacidade e melhor controle do sistema. *Eletricidade Moderna*, p. 30-41.
- GALIANA, F. D et al.; 1996. Assessment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 4 (Nov.), p. 1931-1936.
- GAMA, C.; SILVEIRA, A. S.; 1995. Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) to Improve Transmission System Performance. *Cigre Symp. on Power Electronics in Power Systems*, Tóquio, Japão.
- GARCIA, P. A. N.; PEREIRA, J. L. R.; CARNEIRO, S.; 2000. Modelos Matemáticos de Dispositivos FACTS em Fluxo de Carga Trifásico Desequilibrado. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Automática*, p. 401-406. Florianópolis – SC.
- GYUGYI, L.; SCHAUDER, C. D.; SEN, K. S.; 1997. Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1 (Jan.), p. 406-417.
- GYUGYI, L.; 1990. Solid State Control of AC Power Transmission. *Proceedings of Workshop on the Future in High-Voltage Transmission: Flexible AC Transmission Systems*. Cincinnati, Ohio, Nov, EPRI TR-100540.
- HINGORANI, N. G.; 1988. Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 4 (Abr.), p. 481-482.
- HINGORANI, N. G.; 1993. Flexible AC Transmission. *IEEE Spectrum*. Abril, p. 40-45.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L.; 2000. *Understanding FACTS*. IEEE Press.
- IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY; 1995. *FACTS OVERVIEW*, CIGRÉ.
- KUNDUR, P.; 1994. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, THE EPRI, Power System Engineering Series.

- MACHADO, R. L.; 2003. *Aplicação de Equipamentos FACTS no Sistema de Transmissão da Eletrosul*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Catarina.
- MACHADO, R. L.; ALMEIDA, K. C.; SILVEIRA, A. S.; 2004. A Study on the Impact of FACTS Devices on Southern Brazil transmissions Systems. *Eletroevolução*, p. 54-61, Dezembro.
- MELLO, F. P.; CONCORDIA, C.; 1969. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 88, n. 4 (Abr.), p. 316-1936.
- MENNITI, D.; SCORDINO, N.; SORRENTINO, N.; 2006. A New Method for SSSC Optimal Location to Improve Power System Available Transfer Capability. *Power System Conference and Exposition*. Paper 1-4244-0178-X.
- MONTICELLI, A. J.; 1983. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. Editora Edgard Blücher Ltda.
- MONTICELLI, A. J.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S.; 1987. Security-Constrained Optimal Power Flow with Post-Contingency Corrective Rescheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. PWRS-2, n. 1 (Fev.), p. 175-180.
- NATESAN R.; RADMAN G.; 2004. Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on voltage stability. In *Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory*, p. 546-550.
- OLIVEIRA E. J.; MARANGON LIMA, J. W.; ALMEIDA, K. C.; 2000. Allocation of FACTS Devices in Hydrothermal Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 1 (Fev.), p. 276-282.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS; 2007. *Procedimentos de Rede. Submódulo 23.3, Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*. [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)
- PEREIRA, J. L. R.; 2000. Modelagem de Dispositivos FACTS em Sistemas de Potência para Análise em Regime Permanente. Apostila Minicurso Nº 2, *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Florianópolis-SC.
- RADMAN, G.; RAJE, R. S.; 2006. Power Flow Model /Calculation for Power Systems with Multiple FACTS Controllers. *Electric Power Systems Research*, Article in Press.
- ROTHSTEIN, O. J.; ALMEIDA, K. C.; 2002. Análise do Impacto dos Dispositivos FACTS em Sistemas Sob Mercados Tipo Pool-Bilateral. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, p. 1064-1070, Natal – RN.



- STOT, B.; ALSAÇ, O.; MONTICELLI, A.; 1987. Security Analysis and Optimization. *Proceedings of the IEEE*, v. 75, n. 12 (Dez.), p. 1623-1644.
- TARANTO, G. N.; PINTO, L. M. V. G.; PEREIRA, M. V. F.; 1992. Representation of FACTS Devices in Power Systems Economic Dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 2 (Mai.), p. 572-576.
- VERMA, K. S.; GUPTA, H. O.; 2006. Impact on Real and Reactive Power Pricing in Open Power Market Using Unified Power Flow Controller. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 1 (Fev.), p. 365-371.
- WATANABE, E. H. et al.; 1998. Tecnologia FACTS-Tutorial. *Revista SBA Controle e Automação*, v. 9, n. 1 (Jan., Fev., Mar., Abr.), p. 39-55.
- WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; JESUS, F. D.; 2007. *Relatório Técnico Científico Nº 2*. Projeto ONS-UFRJ: Aplicação de Dispositivos FACTS Para a Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN.
- WEI, X. et al.; 2004. A Common Modeling Framework of Voltage-Sourced Converters for Load Flow, Sensitivity, and Dispatch Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 2 (Mai.), p. 934-941.
- ZHANG, X. P.; HANDSCHIN, E.; YAO, M.; 2001. Modeling of the Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC) in a Nonlinear Interior Point OPF. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 3 (Ago.), p. 367-372.
- ZHANG, X. P.; 2003. Advanced Modeling of the Multicontrol Functional Static Synchronous Series Compensator (SSSC) in Newton Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.18, n.4 (Nov.), p. 1410-1416.
- ZHANG, Y. et al.; 2006. Power Injection Model of STATCOM with Control and Operating Limit for Power Flow and Voltage Stability Analysis. *Electric Power Systems Research*, p.1003-1010.